CCM
CONSEJO DE COMPETENCIAS MINERAS

Cuaderno del Instructor
Módulo 6: “Mantenimiento de tren de potencia”.
PFMME-3-02/V.1-[PE01-M06/v.1]

Una iniciativa de:

CONSEJO MINERO

Con la asesoría experta de:

Innovum | FCH FUNDACIÓN CHILE

Equipo Consejo Minero

Joaquín Villarino H., Presidente Ejecutivo
Carlos Urenda A., Gerente General
Christian Schnettler R., Gerente del Consejo de Competencias Mineras
José Tomás Morel L., Gerente de Estudios
María Cecilia Valdés V., Gerente de Comunicaciones
Sofía Moreno C., Gerente de Comisiones y Asuntos Internacionales
Claudia Díaz R., Jefe de Proyectos

Equipo Innovum Fundación Chile

Hernán Araneda D., Gerente
Diego Richard M., Director Programa Fuerza Laboral Minera
Rafael Pizarro G., Jefe de Proyecto Empresas
Susana Gallardo S., Especialista de Formación
Eduardo Soto S., Consultor Senior
Ignacio Riffo C., Consultor Senior
Álvaro Aguilar H., Consultor de Proyectos
Carolina Gutiérrez M., Consultor de Proyectos

Consejo Minero
Dirección: Apoquindo 3500, Piso 7, Las Condes, Santiago.
Teléfono: (562) 2347 2200
www.ccm.cl

Propiedad del Consejo de Competencias Mineras (CCM) del Consejo Minero:

Este material es propiedad del Consejo de Competencias Mineras (CCM) del Consejo Minero. Está disponible para instituciones que imparten formación en el ámbito minero en Chile, a las que se autoriza la reproducción total o parcial de los contenidos de este material para fines de formación, citando siempre al Consejo de Competencias Mineras del Consejo Minero y pudiendo incluso adaptarlo para satisfacer los requerimientos de los participantes. Se prohíbe la reproducción o adaptación con fines comerciales.

El uso del género masculino en esta publicación no constituye discriminación; tiene el sólo propósito de aligerar el texto cuando la redacción así lo exige.

TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS, QUEDA AUTORIZADA SU REPRODUCCIÓN Y DISTRIBUCIÓN CITANDO LA FUENTE. © Anglo American Norte S.A., Anglo American Sur S.A., Anglo American Chile Ltda.; Antofagasta Minerals S.A.; BHP Chile Inc.; Compañía Minera Barrick Chile Ltda.; Compañía Minera Cerro Colorado Ltda., Minera Escondida Ltda., Minera Spence S.A.; Compañía Minera Zaldívar Ltda.; Corporación Nacional del Cobre de Chile; Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi SCM; Compañía Contractual Minera Candelaria, Sociedad Contractual Minera El Abra; FreeportMcMoran South America Inc.; Glencore Chile S.A.; SCM Minera Lumina Cooper Chile; Sierra Gorda SCM; Teck Resources Chile Ltda.; Yamana Chile Servicios Ltda.; 2013.

Consejo de Competencias Mineras – CCM:

El Consejo de Competencias Mineras (CCM) es una iniciativa de articulación entre las empresas mineras, cuyo fin es proveer información sectorial, estándares y herramientas que permitan al mundo formativo adecuar la formación de técnicos a la demanda del mercado laboral minero, tanto en términos cualitativos como cuantitativos. Con la asesoría experta de Innovum Fundación Chile, este organismo genera, con un enfoque sistémico, insumos para el mundo formativo, dando a conocer qué necesidades de capital humano tiene la minería y transfiriendo buenas prácticas para su formación.

El Consejo de Competencias Mineras – el primero de su naturaleza en el país – opera al alero del Consejo Minero. Fue formado en 2012 y cuenta con 12 empresas socias. A tres años de su creación, el CCM ha desarrollado una serie de productos y sistemas que han marcado un cambio de paradigma en la vinculación del mundo productivo con el de la formación para el trabajo, y han significado un aporte de fondo para el mejoramiento y la valoración de la educación técnico-profesional en el país, con un alcance que trasciende ampliamente a la sola industria minera.
Los Paquetes para Entrenamiento, son uno de estos productos. Se han creado además: Estudios de Fuerza Laboral, El Marco de Cualificaciones para la Minería (MCM), Marco de Calidad de Buenas Prácticas Formativas, Marco de Calidad para Instructores e impulsamos el apoyo sectorial al Sistema de Certificación de Competencias Laborales.

Si bien el Consejo de Competencias Mineras es una entidad privada, sus productos están concebidos como bienes públicos y gratuitos, de valor compartido para todos los estamentos de la sociedad en Chile. Toda la información y los productos generados por el CCM, además de un breve video explicativo, están disponibles en el sitio web: www.ccm.cl

El desafío que ahora enfrenta el CCM es que, tanto el mundo formativo como el minero, incorporen los estándares generados a sus procesos de negocio y a su quehacer diario. Esto generará una fuerza laboral más productiva y, por ende, mayor competitividad del país en el contexto internacional.

Contribución del CCM

Para trabajadores actuales y personas interesadas en trabajar en la minería:

- Mejor empleabilidad.
- Aprendizaje adecuado a los requerimientos del mercado.
- Acceso no sólo a un oficio, sino a rutas de formación y aprendizaje.

Para el sector minero:

- Mitigación de la escasez de personal, anticipándose al problema de manera coordinada y con visión de futuro.
- Mejora de productividad, al contar con más trabajadores preparados para los requerimientos de la industria, tanto propios como de proveedores.
- Mayor competitividad de esta industria, que repercute positivamente también en la competitividad del país.

Para las instituciones educacionales:

- Mejor empleabilidad de sus egresados.
- Mejor información proyectada a 8 a 10 años, para potenciar programas formativos en los oficios para los cuales se anticipa una mayor brecha de capital humano.
- Oportunidad para el reconocimiento de la industria respecto a su calidad formativa.

Para la comunidad y el país:

- Asignación más eficiente de fondos públicos de educación y capacitación, al tener identificados programas adecuados para satisfacer requerimientos del mercado.
- Disminución de la presión que se ejerce sobre otros sectores productivos por la demanda de trabajadores, al aumentar la cantidad de personas calificadas para la minería.

Índice

Módulo VI: Mantenimiento del Tren de Potencia 8
1. Operación y funcionamiento del sistema de transmisión 9
1.1 Funcionamiento y operación de los convertidores de torque 9
1.2 Convertidor de torque de capacidad Variable. 39
1.3 Válvulas de control y modulación del convertidor de torque 42
1.4 Funcionamiento y operación de las transmisiones planetaria. 48
1.5 Tipos de transmisiones usadas en equipos mina 49
1.6 Válvulas de control y modulación de la transmisión. 65
1.7 Circuitos hidráulicos de la transmisión y convertidor 75
2. Mantenimiento del sistema de transmisión 92
2.1 Tapones magnéticos y filtros. 93
2.2 Inspección de tapones magnéticos y filtros 99
2.3 Diferenciales y mandos finales 109
3. Modos de falla de uniones apernadas y engranajes 126
3.1 Concentradores de esfuerzos anormales 179
3.2 Fracturas por proceso 179
3.3 Cinco conceptos básicos de desgaste 182
3.4 Causas más comunes de fallas en pernos 233
3.5 Análisis de falla aplicada a engranajes 244
Actividad N° 19 316
Actividad N° 20 327
Actividad N° 21 331

Descripción del documento

El Cuaderno del instructor contiene la totalidad de los contenidos a utilizar por el instructor para el desarrollo del programa de formación de Mantenedor Mecánico Avanzado Equipos Fijos.

El documento está dividido en módulos, los cuales están organizados en secciones de temas y contenidos específicos.

El instructor, podrá, además, sugerir actividades como las que se indican a continuación:

- Charlas y/o reflexiones de seguridad.
- Discusiones o foros de debate.
- Reforzamientos.
- Actividades en terreno.
- Preparación para la evaluación final

Específicamente para las actividades relacionadas a tecnologías de comunicación audiovisual se entregarán links a modo referencial, sin embargo, el instructor tendrá la libertad de utilizar los recursos que estime conveniente a fin de lograr los objetivos planteados para la actividad.

Todo el material es susceptible de ser mejorado, adaptado o modificado en función de las características del grupo con el que se trabaje. Por ello se ha diseñado desde un enfoque flexible, que permite al instructor agregar recursos que enriquezcan algún contenido, favoreciendo también el aporte de los participantes, cuidando siempre de lograr los aprendizajes esperados de cada módulo.

Respecto de las evaluaciones se sugiere que éstas sean elaboradas por el instructor de acuerdo a los siguientes lineamientos

La evaluación de los módulos y sus contenidos debe estar compuesta por a lo menos 10 preguntas, las cuales deben ser extraídas del documento de evaluación de proceso.

Cada pregunta será evaluada con puntajes entre 0 y 10. La escala de calificación será de 0 a 100%. Considerando el 0% cuando el participante no tiene respuestas correctas y el 100% cuando posee la totalidad de respuestas correctas. La nota de aprobación de las evaluaciones de los distintos módulos corresponderá a un 75% de aciertos.

Módulo VI: Mantenimiento del Tren de Potencia

1. Operación y funcionamiento del sistema de transmisión

1.1 Funcionamiento y operación de los convertidores de torque

El embrague mecánico automotriz normal depende de la fricción para su operación básica. También requiere de varillas mecánicas, o mecánicas e hidráulicas para acoplarlo y desacoplarlo por acción del operador.

El convertidor de par y el acoplamiento fluido utilizan un fluido como medio de transferencia de potencia, en lugar de acoplar y desacoplar el embrague de fricción. En efecto, por lo tanto, el convertidor de par de torsión transmite el par de motor por medio de fuerza hidráulica. En este contexto, hidráulico significa líquido, y par motor significa torcimiento, y convertir significa cambia; por tanto, el convertidor de par cambia o multiplica el esfuerzo de torcimiento del cigüeñal del motor a través del uso de un fluido hidráulico. Esta potencia es dirigida después a través de una transmisión, que ofrece una cantidad infinita de velocidades apropiadas para la carga y velocidades particulares del vehículo.

Debido a su diseño y función, el convertidor de par acopla y desacopla automáticamente la transferencia de potencia del motor a la transmisión, en función a las rpm del motor. Con el motor funcionando a una velocidad de marcha en vacío, no hay transferencia de potencia a través del convertidor de par, porque el flujo de fluido es insuficiente. Sin embargo, conforme aumenta la velocidad del motor, el flujo adicional de fluido puede crear suficiente fuerza para transmitir potencia del motor por medio del conjunto del convertidor de par de torsión.

Forma básica del convertidor de par

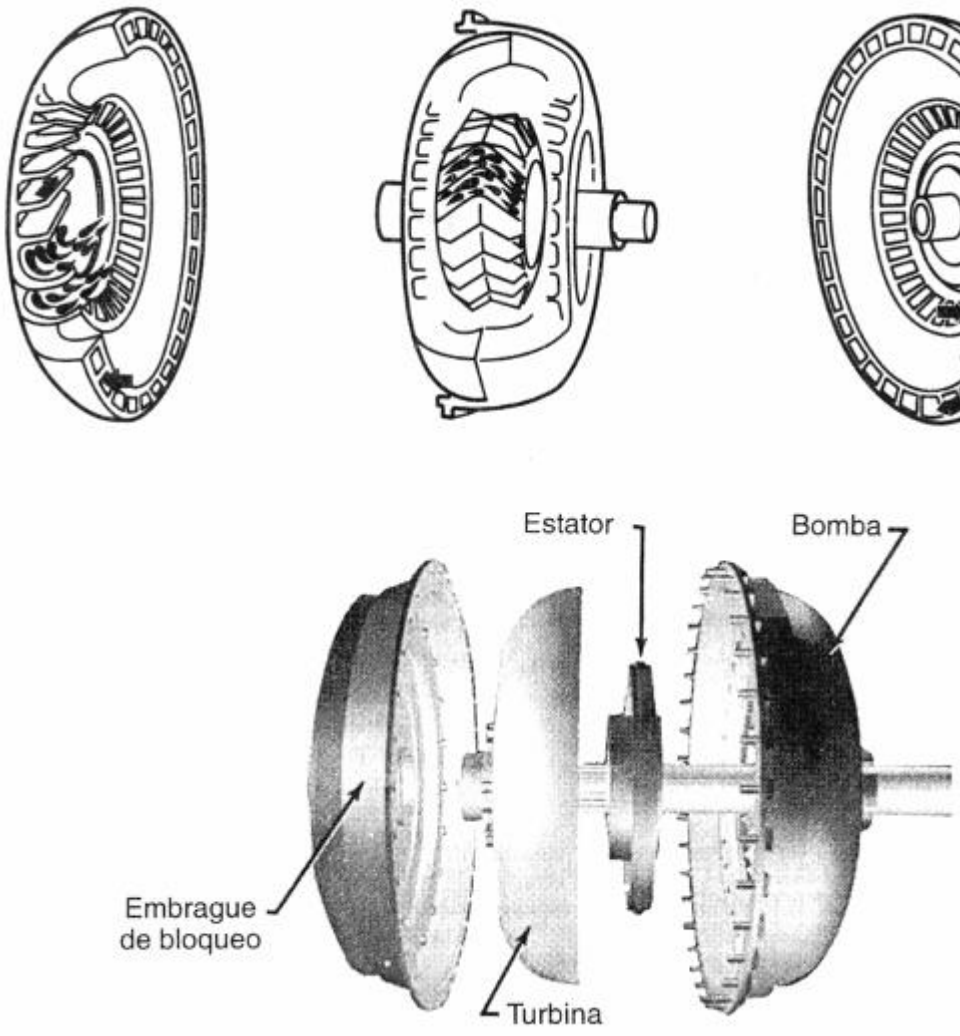


Figura 1

La figura 1 ilustra el concepto básico de un conjunto de convertidor de par de tres elementos, que consta de una turbina, un estator y una bomba (impulsor). El estator va armado dentro del alojamiento del convertidor de par.

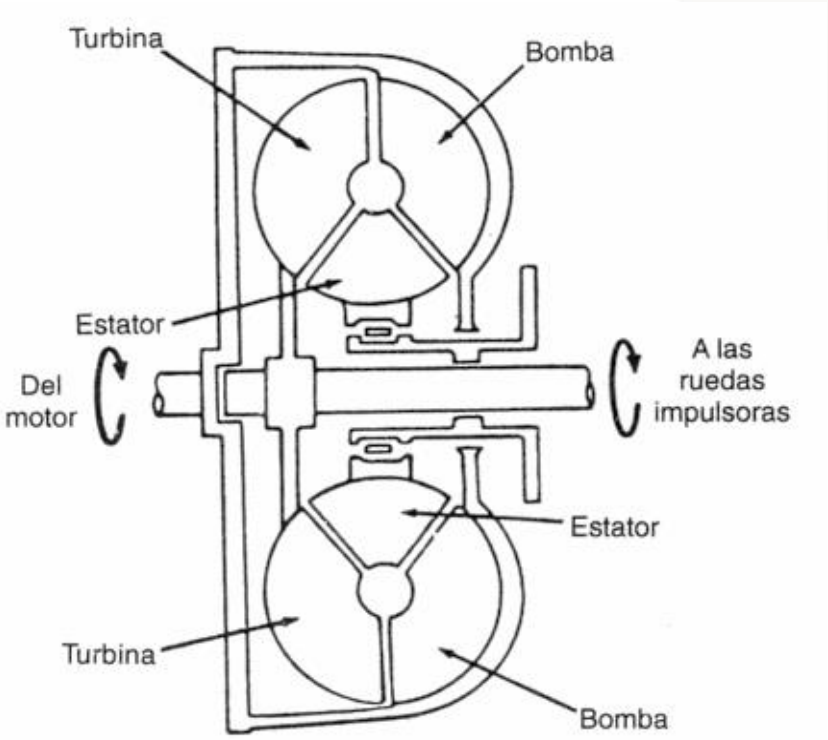


Figura 2

La figura 2 muestra la conexión del alojamiento del convertidor a la parte trasera de la ceja del cigüeñal del motor. La parte de la bomba del convertidor de par dirige aceite presurizado contra la turbina para hacerla girar. La turbina está conectada a una flecha, para transferirle potencia a la transmisión.

El estator se usa para redirigir el flujo de la turbina de regreso hacia la parte de la bomba, para completar el flujo de aceite.

Los convertidores de par que están cerrados con soldadura se usan en los vehículos para trabajo ligero (automóviles y camiones pickup) y en algunos vehículos para trabajo mediano, en tanto que los camiones para trabajo pesado de carretera y fuera de ella por lo general emplean modelos de convertidores de par que están armados con pernos. Esta característica permite que el convertidor de par se pueda desarmar y darle mantenimiento general cuando sea necesario.

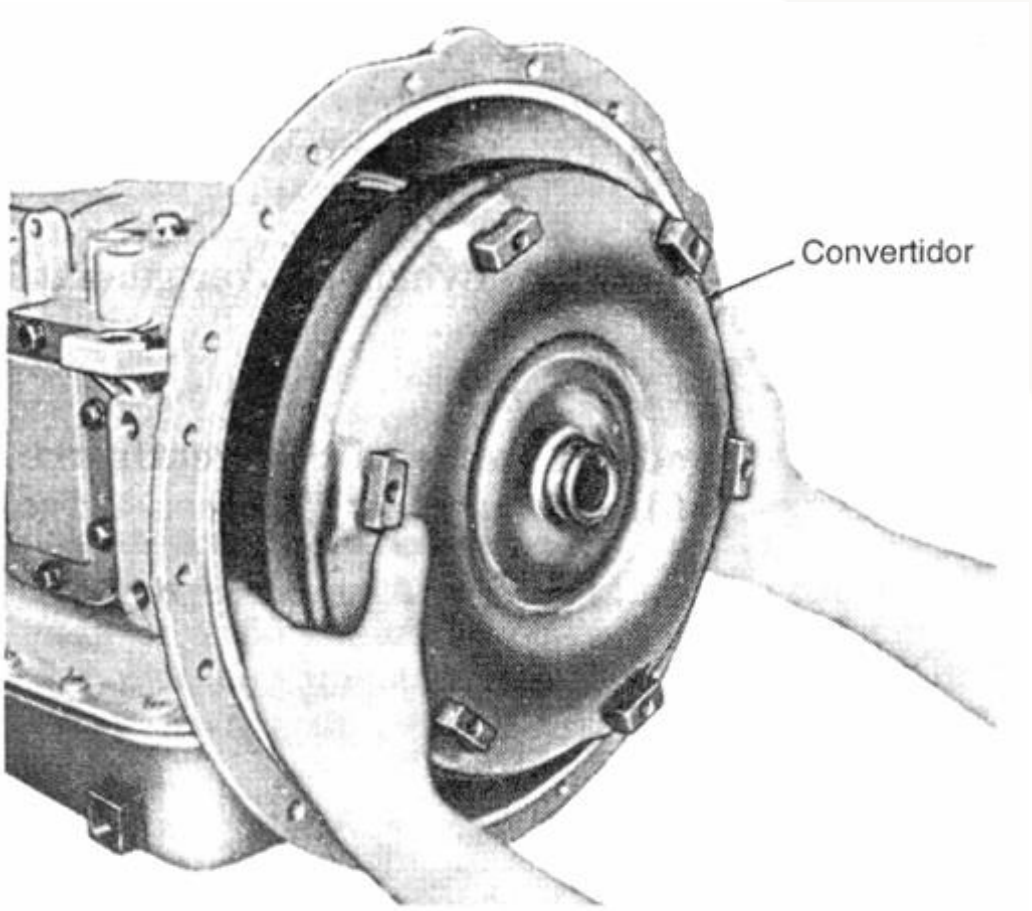


Figura 3

La figura 3 muestra un convertidor de par soldado, que se instala en la parte delantera del alojamiento de campana de la transmisión en el modelo de camión Allison AT, y la figura 4 muestra la manera en que se transmite la potencia del convertidor de par a la entrada de la transmisión (turbina). El convertidor de par de tipo soldado está unido a un disco flexible que a su vez está atornillado a la parte trasera de la ceja del cigüeñal del motor.

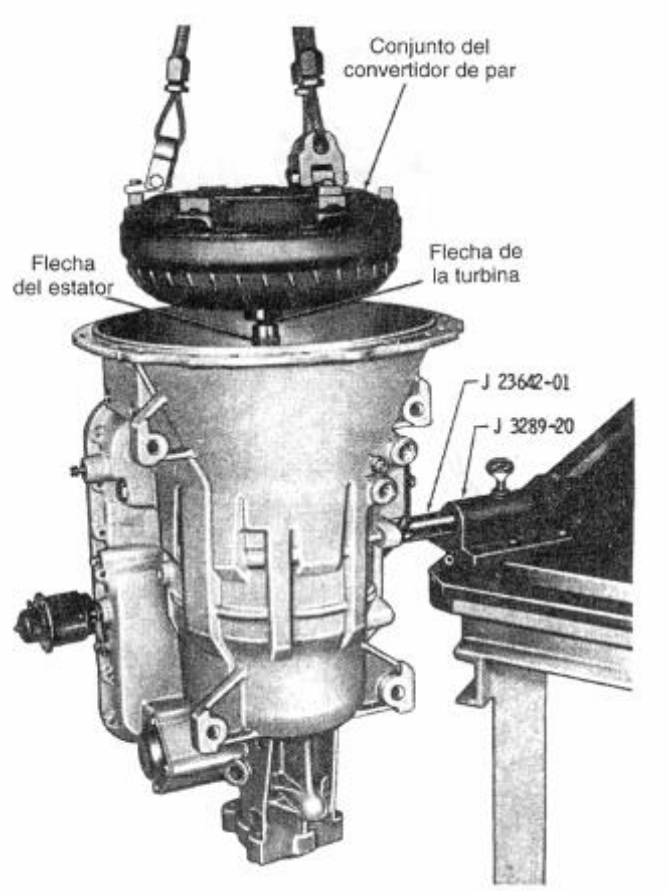


Figura 4

En los camiones y autobuses para trabajo pesado, el convertidor de par de tipo atornillado se conecta al volante del motor, o parte trasera de la ceja del cigüeñal por medio de una serie de platos circulares de acero, planos, delgados, que lo general se conocen como el ensamble de platos flexibles.

Si no se usa un volante de motor, el engrane corona del motor de arranque se sujeta al adaptador del plato flexible. Un módulo de convertidor de par de modelo Allison WT (World Transmisión) de la serie MD, controlado electrónicamente. Las costillas que se muestran en el exterior del alojamiento del convertidor sirven para que el sensor de velocidad del motor determine las rpm del módulo del convertidor de par, que está unido con pernos a la parte trasera del cigüeñal del motor. El disco flexible también permite cierto grado de desalineación entre motor y conjunto de convertidor de par, para que la alineación exacta en la instalación no sea crítica para la operación del convertidor.

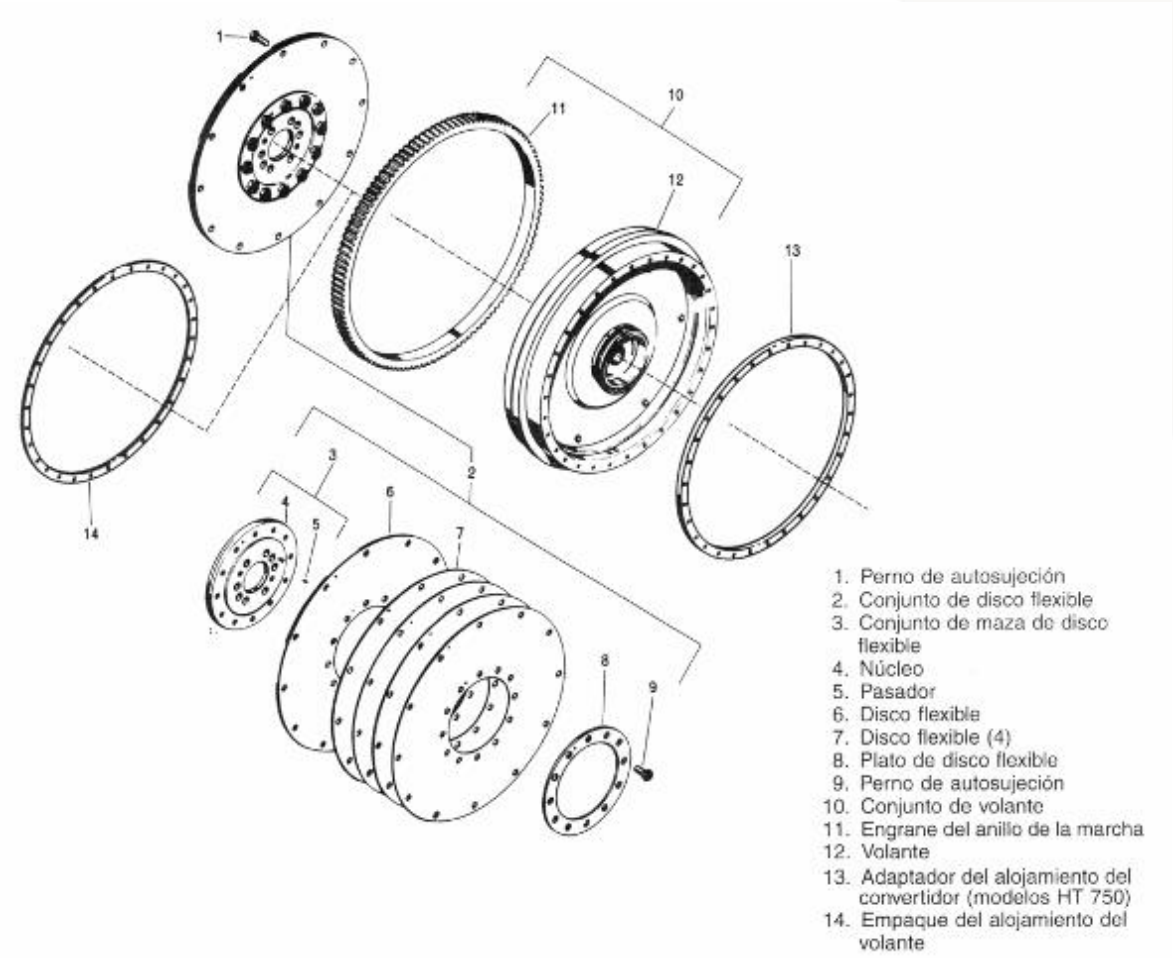


Figura 5

En la parte trasera del convertidor de par tanto la turbina como la flecha del estator se deslizan por un agujero central en el alojamiento del convertidor. La flecha soporte del estator es estacionaria y forma parte del alojamiento de la bomba de aceite, que está acoplada con pernos al alojamiento de la transmisión. La flecha del estator se extiende en el alojamiento del convertidor de par y se une por medio de estrías a la turbina dentro del alojamiento del convertidor de par, mientras que el otro extremo se extiende a través de la flecha hueca del estator, en el conjunto delantero de embrague de la transmisión.

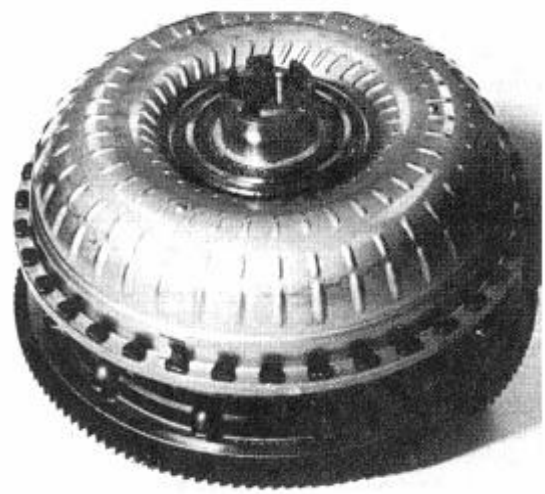


Figura 6

La extensión de la ceja en la parte trasera del alojamiento del convertidor de par tiene dos ranuras, que acoplan con la bomba de aceite de la transmisión que cuando el motor esté funcionando, el aceite a presión de la bomba pueda ser suministrado tanto al convertidor de par como al cuerpo de la válvula de transmisión, embrague, etcétera.

Ventajas del convertidor de par de torsión

1. Permite que el motor opere con una salida más eficiente
2. Protege al motor contra dañinas cargas de choque y esfuerzos a baja velocidad y paradas.
3. Como el par motor se multiplica hidráulica y automáticamente con relación a la velocidad del motor, la potencia del motor se equilibra con la carga mucho más eficiente.
4. Elimina el adivinar cuál es la velocidad adecuada y evita fatiga del conductor cuando está acoplada a un tipo de transmisión automática o de cambio de potencia.
5. Proporciona una infinidad de relaciones variables de par motor dentro de su rango específico de diseño.

Operación básica del convertidor de par

Cuando los ventiladores están uno frente a otro y uno se conecta, el impacto de aire del ventilador conectado hace que el otro gire. El aire es el medio de transferencia de potencia. Sin embargo, la transmisión de potencia es ineficiente, porque los ventiladores no están en un área.

Figura 7

Para obtener la transferencia de potencia de un convertidor de par y un acoplamiento por fluido, se usa aceite como medio de transferir energía. La figura 8 (a) muestra la mitad del convertidor de par mientras está estacionario y lleno de aceite; la figura 8 (b) muestra el mismo miembro al girar.

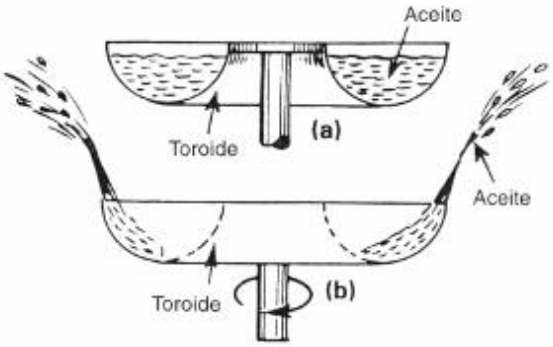


Figura 8

A lo largo del tiempo se han usado varios términos para identificar los componentes del convertidor de par y el acoplamiento fluido. El miembro impulsor unido al volante del motor se le ha llamado simplemente toroide impulsor, en tanto que el miembro impulsado se le llamó toroide impulsado. Aunque estos nombres son correctos en teoría, son más comúnmente conocidos como impulsor o bomba, que es el miembro impulsor y turbina, que es el miembro impulsado.

La figura 8(a) ilustra el aceite dentro del impulsor mientras está estacionario. La figura 8(b) muestra que, cuando gira el impulsor, la fuerza centrífuga tiende a lanzar el aceite hacia fuera y arriba debido a la forma del alojamiento del impulsor, que es curvo.

Mientras más rápida sea la velocidad del impulsor, mayor será la fuerza centrífuga, y más lejos volará el aceite. La energía del aceite que sale del impulsor en la figura 8b no produce trabajo realmente utilizable en este momento.

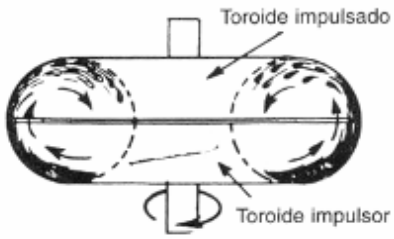


Figura 9

Para utilizar parte de esta energía, podemos colocar otro componente, llamado turbina, directamente sobre el impulsor como se muestra en la figura 9. Cuando se hace girar nuevamente el impulsor, el aceite que sale del impulsor impartirá esta energía a la turbina, y hará que gire.
Aunque la figura 9 muestra el impulsor y la turbina en posición horizontal, en realidad en un motor van montados en posición vertical, para transferir potencia del motor a la transmisión.
A su vez los diferentes tipos de convertidores se subdividen de acuerdo a:

- Elementos
- Fases
- Etapas

Elementos
Es la cantidad de componentes principales de los que está construido el convertidor, y este dependerá de las fases y etapas.
Ej. Convertidor de 3 elementos, significa que tiene 1 bomba, 1 turbina y 1 estator.
Ej. Sera de 4 elementos si la turbina está dividida en 2 secciones.

Fases
Es la cantidad de secciones en la cual estará dividido el estator, además dependerá también si tiene una rueda libre o embrague.

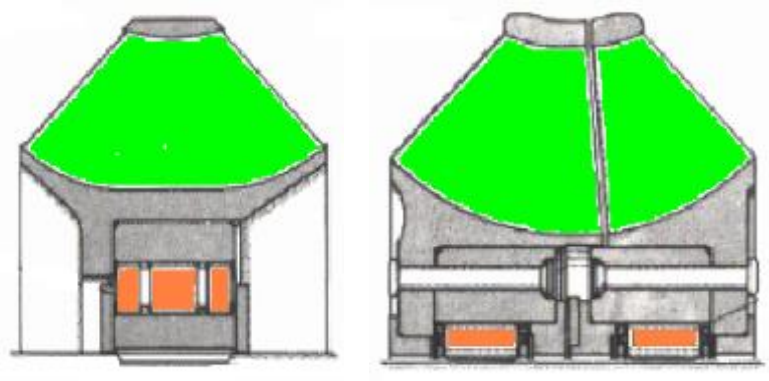


Figura 10

Ejemplo de una fase **Ejemplo de 2 fases**

Etapas
Es la cantidad de secciones en la cual estará dividida la turbina.

No hay acoplamiento mecánico directo entre impulsor y turbina, porque operan dentro del alojamiento sellado del acoplamiento fluido o convertidor de par. Una bomba de aceite impulsada por el motor alimenta continuamente fluido a presión al convertidor de par por medio de una flecha hueca en el eje central del conjunto giratorio del convertidor. Por medio de un sello se evita la pérdida de aceite en cualquier momento.
Dentro de la flecha hueca hay otra flecha unida por medio de estrías a la turbina, para permitir la transferencia de potencia de la turbina a la transmisión. Entre el diámetro exterior de esta flecha de turbina y el diámetro interior del manguito o soporte, del estator del convertidor de par el aceite que sale de la turbina es dirigido al alojamiento del convertidor de par a un enfriador exterior de aceite, de donde el aceite regresa entonces al resumidero de la transmisión.

En cualquier momento en que está neutral la transmisión, no puede pasar potencia hacia las ruedas del vehículo. Cuando la transmisión está en velocidad y el pie del conductor está sobre el pedal del freno, el vehículo no se moverá estando el motor en marcha en vacío. Esto se debe, a que por la baja velocidad de giro del motor, se genera insuficiente fuerza centrífuga en el aceite del impulsor para hacer girar la turbina parada.
Sin embargo, cuando se acelera el motor, la alta velocidad de rotación del impulsor crea considerable fuerza centrífuga en el aceite, que entonces es dirigido contra la turbina para causar la transferencia de potencia a la flecha de turbina y luego a la transmisión (con los frenos liberados).

Bomba o impelente
La bomba y la turbina de un convertidor de par tienen muchas secciones divididas con álabes, y cada sección puede compararse con una tubería retorcida por la que fluye aceite.

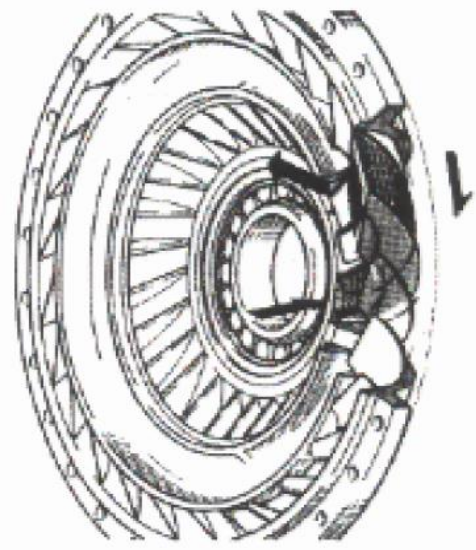


Figura 11

Si la bomba gira, el aceite que contiene girará también, fluyendo por los orificios de entrada y salida mediante la fuerza centrífuga. En la siguiente figura, las velocidades de flujo en los orificios de entrada y salida están indicadas mediante una flecha oscura, y las direcciones del flujo están a lo largo de los álabes en los orificios. Las velocidades reales del flujo son la suma de las velocidades de flujo anteriores y la velocidad de la bomba (indicadas como una flecha clara). Estas velocidades están indicadas por la flecha achurada. La velocidad delo flujo varia en los orificios de entrada y salida de esta manera.

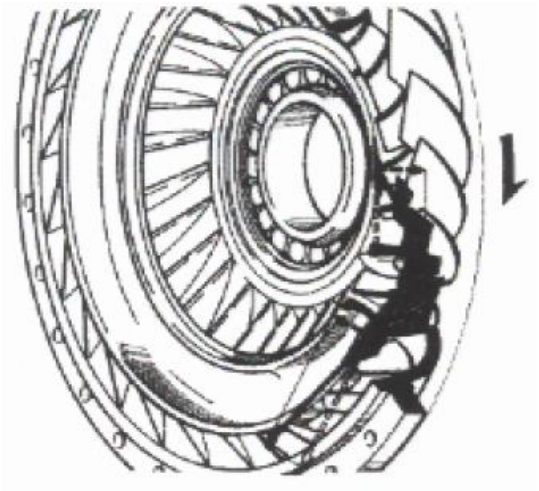


Figura 12

Lo que cambia la velocidad del flujo de aceite en la bomba o impelente, es la fuerza con la cual actúa el aceite en la bomba. El par motor se usa para dar fuerza a la actuación del aceite, y este par se llama "fuerza de absorción" de la bomba. La magnitud de este par es proporcional al equilibrio entre los valores obtenidos multiplicando las velocidades de flujo circunferencial, en los orificios de entrada y salida de la bomba por los diámetros de estos orificios. El par es también proporcional al caudal.

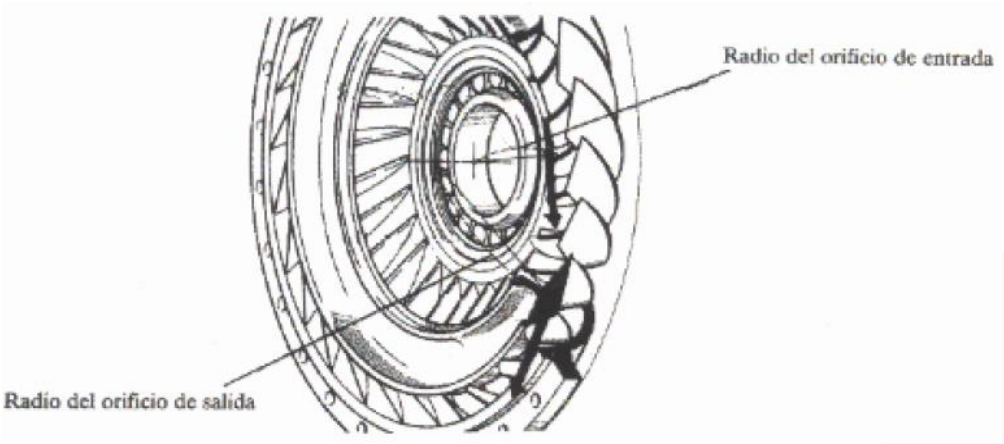


Figura 13

La velocidad de flujo circunferencial implica la velocidad del componente circunferencial de la velocidad del flujo.

Ahora, si se hace girar el impelente o bomba con más velocidad, el caudal aumentara y, simultáneamente, el par de absorción de la bomba aumentara notablemente. Si se mantiene constante la relación de velocidad, el par de absorción será proporcional al cuadrado de las revoluciones (velocidad), como se indica en la siguiente figura.

El motor funciona de modo que el par de absorción de la bomba se equilibre con el par del motor. Es decir, el motor funciona a una velocidad en las que las curvas de par de absorción de la bomba o impelente y el par del motor se corten. Por esta razón, si la velocidad del motor se reduce disminuyendo la entrega de combustible, el motor trabajara a bajo par (indicado por la línea punteada del gráfico siguiente), reduciendo la fuerza de tracción de la máquina.

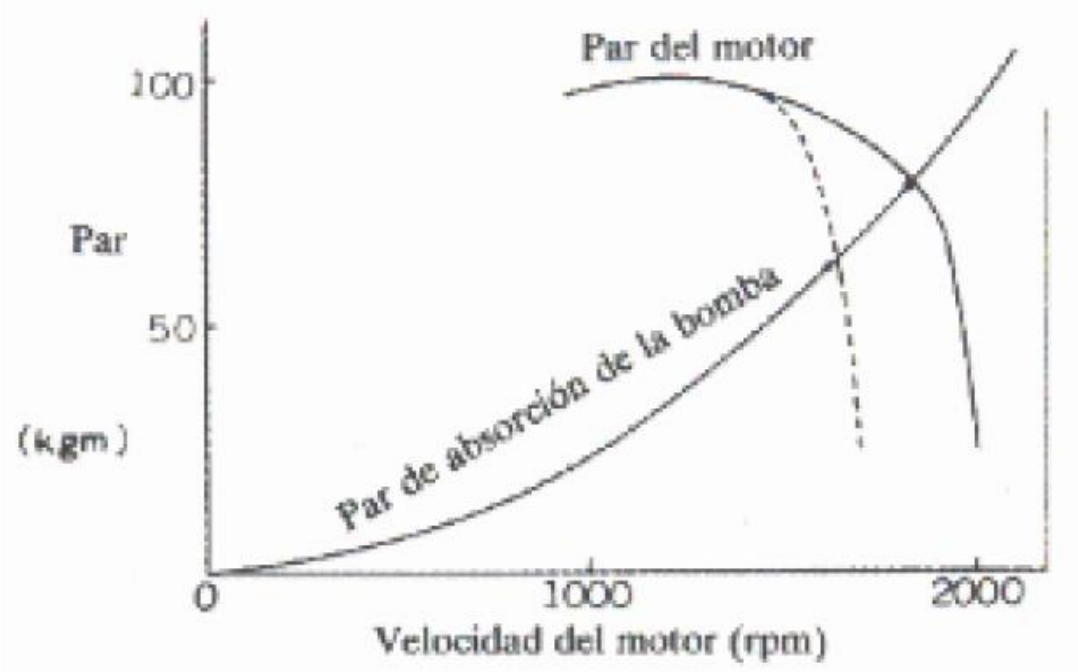


Figura 14

La absorción del par del motor por el impelente o bomba, significa la absorción de la potencia del motor por la bomba, y la potencia de la bomba es proporcional al cubo de la revoluciones del motor.

En la siguiente figura se da un gráfico en unidades de potencia (caballos de vapor) que remplaza al gráfico de la figura anterior, en la figura siguiente, el motor esta accionado con la potencia a un punto donde las curvas de potencia de absorción de la bomba y la potencia del motor se cortan.

Respecto a lo anterior, se entiende que si el motor se maneja a poca velocidad, la bomba funcionara a una potencia baja, lo cual resulta en una baja eficiencia de operación del motor.

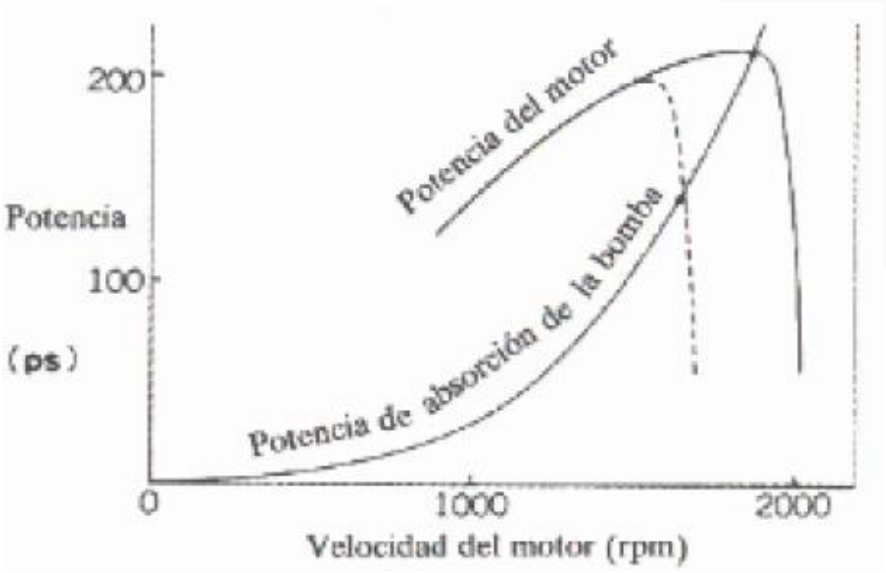


Figura 15

Cuando mayor sea la capacidad del convertidor de par, mayor será la potencia de absorción de la bomba. Si se usa un convertidor de par comparado con el rendimiento del motor, el motor funcionara a una potencia baja, con lo que será imposible que el motor rinda al máximo. Entonces, un convertidor de par debe tener un tamaño y capacidad correspondientes al rendimiento del motor.

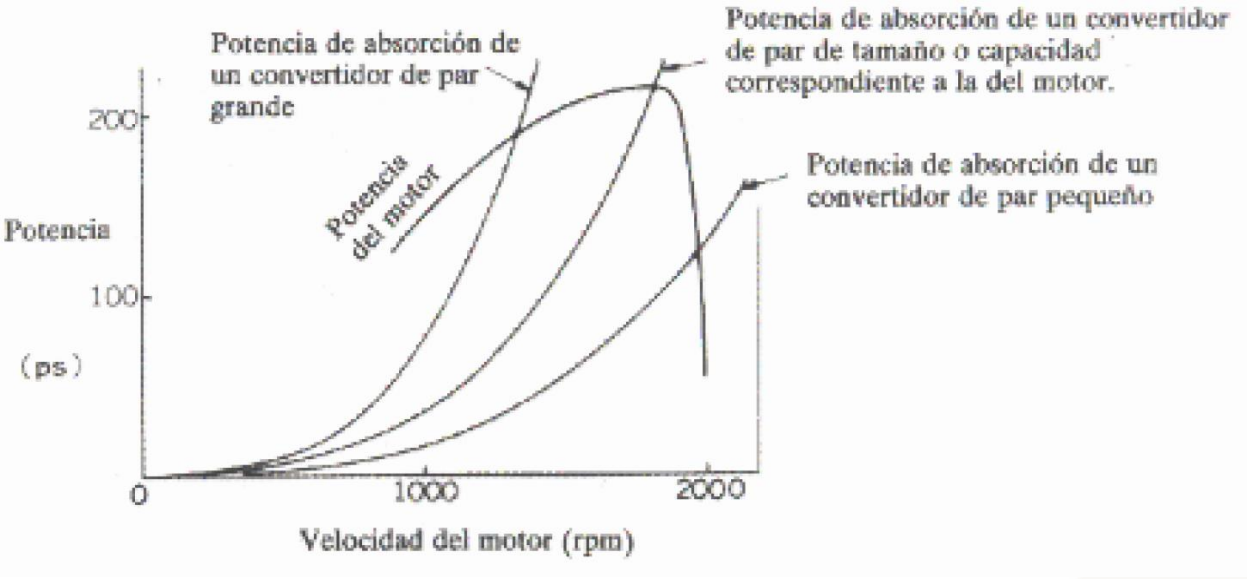


Figura 16

En un cargador frontal la bomba hidráulica del sistema, esta accionada directamente por el motor y la potencia restante del motor se transmite al convertidor de par. Por lo tanto, a menos que se use un convertidor de torque adecuado para la curva la curva de rendimiento del motor, donde la potencia de funcionamiento de la bomba hidráulica se deduzca de la potencia del motor, el rendimiento del motor no podrá utilizarse al máximo. Por tal motivo, una pala cargadora tiene más potencia en el motor o tiene un convertidor de par más pequeño que un bulldozer.

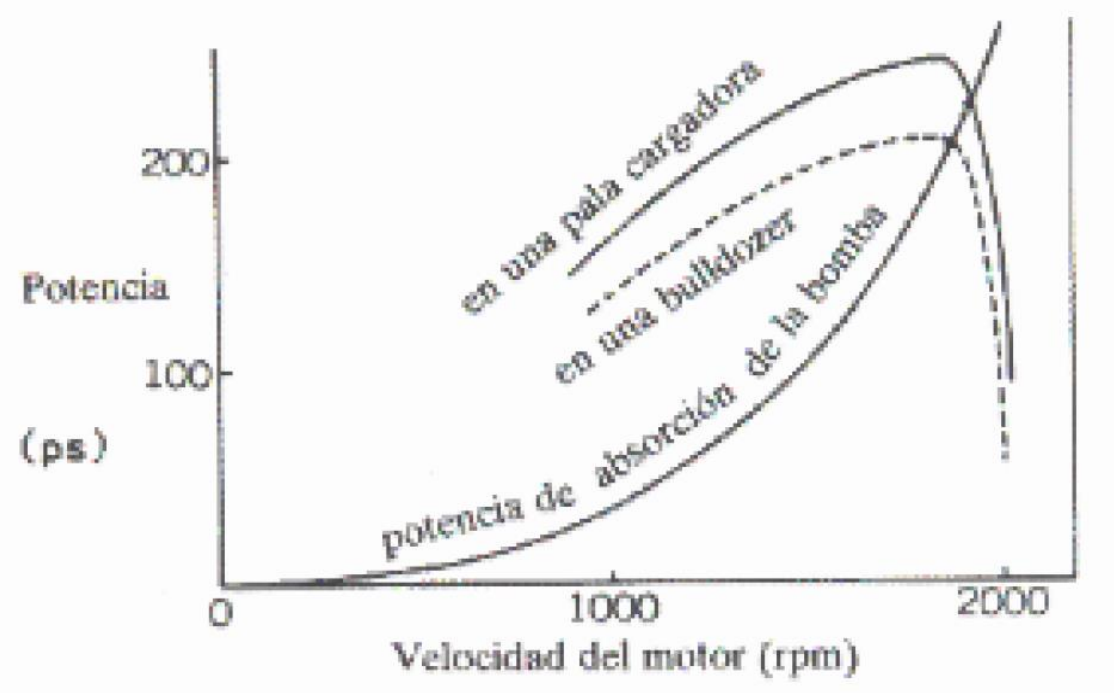


Figura 17

Si el aceite de la caja del convertidor aumenta demasiado debido a los defectos en las juntas, bomba de barrido y otro componente que pueda fugar etc. El aceite se agitara en la caja depósito, lo que a su vez consumirá la potencia del motor reduciendo la potencia que debe ser absorbida por la bomba.

En efecto, la capacidad de un convertidor de par es alta comparado con la potencia que se debe transmitir al convertidor. La potencia que se debe absorber por la bomba se reducirá mucho más que la que se reduce al agitar el aceite. En este momento, si en convertidor se cala o entra en stall, la velocidad del motor se reducirá más que cuando se cale antes de deteriorarse la bomba de barrido, sellos u otros elementos con fuga etc. Tal reducción de potencia ocurrirá también solo si el motor esta averiado.

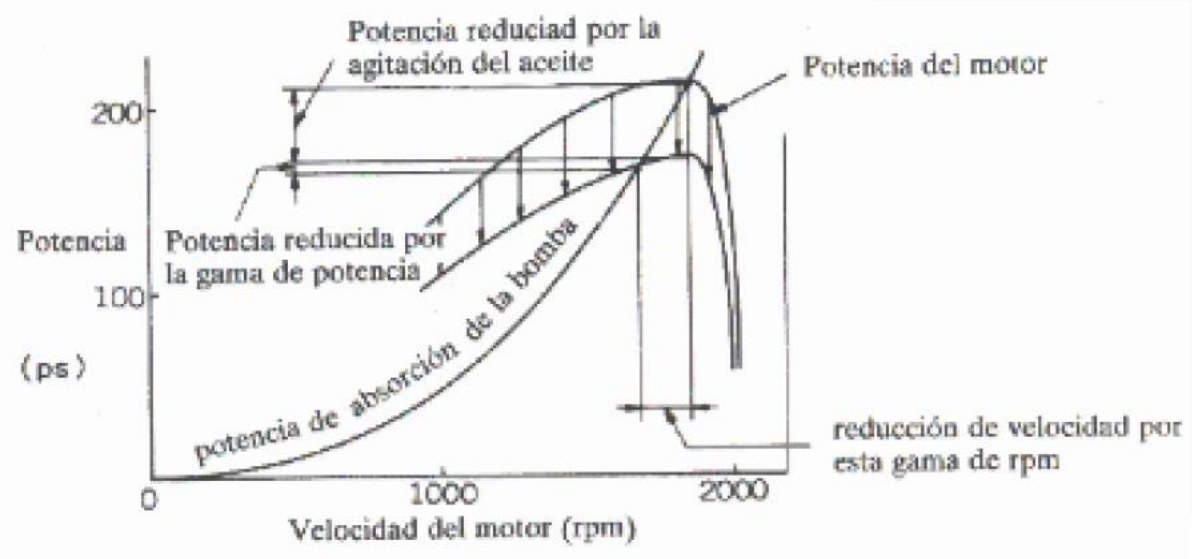


Figura 18

Si la relación de velocidad de la turbina varía, la potencia de absorción de la bomba variara también tal como se muestra en la siguiente figura. Consecuentemente, la velocidad del motor variara en cierto grado. No obstante, los cambios de la velocidad del motor de esta magnitud no se notan, a diferencia de las maquinas a transmisión directa. Por el contrario, en una máquina que está equipado con un convertidor de par, se debe prestar atención a los cambios en la velocidad de la maquina en vez de los cambios en la velocidad del motor para evitar malgastar la potencia del motor.

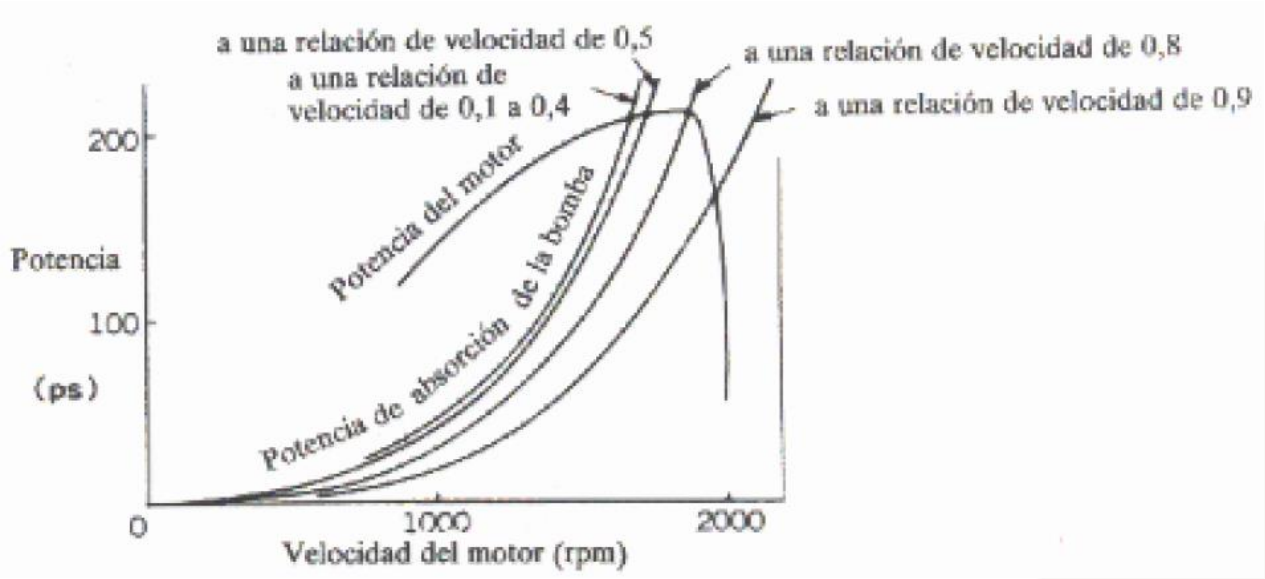


Figura 19

Flujo de aceite dentro del convertidor de par

Hay dos tipos de flujo de aceite dentro del conjunto del convertidor de par: flujo giratorio y de vórtice.

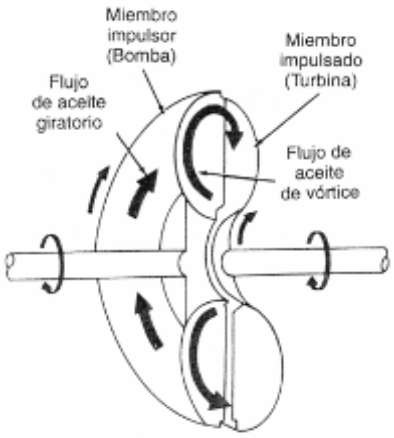


Figura 20

La figura muestra estos dos flujos de aceite. El flujo giratorio del aceite es el flujo alrededor de la circunferencia del convertidor de par causado por su giro proveniente del motor, en tanto que el flujo de vórtice del aceite es el del aceite del impulsor a la turbina y de regreso al impulsor. El flujo de vórtice continúa en una espiral interminable alrededor del interior del conjunto de convertidor de par.

La figura muestra el patrón de flujo de aceite conforme la velocidad de la turbina se acerca a la del impulsor. Esto se conoce comúnmente como punto de acoplamiento, porque la turbina está funcionando a la misma velocidad básica del giro de impulsor. La turbina y el impulsor no giran exactamente a la misma velocidad debido al deslizamiento del aceite entre ellos. La única manera en que pueden girar ambas a la misma velocidad es bloqueándolas mecánicamente, lo cual se explicará en detalle en este capítulo con el título de “embrague de bloqueo del convertidor de par”.

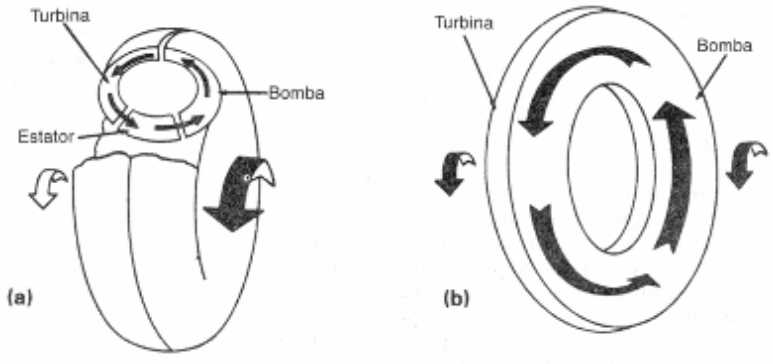


Figura 21

(a): La multiplicación del par ocurre a través del cambio de dirección del fluido por el conjunto estator, para que la velocidad del aceite que regresa de la turbina se acelerara a través del estator para ayudar al giro del miembro impulsor.

(b): El flujo giratorio o vórtice ocurre a bajas velocidades y carga pesada, cuando la velocidad de la turbina se acerca a la velocidad del impulsor (punto de acoplamiento) a más altas velocidades del camino, con bajas demandas de par, solamente ocurre el flujo giratorio.

Anillo guía partido

Para que fluya la potencia por el convertidor del par, el impulsor debe girar más a prisa que la turbina. Esta acción dentro del convertidor de par crea alta turbulencia en el aceite. En ciertas circunstancias, especialmente cuando existe una diferencia considerable de velocidad entre los miembros impulsor e impulsado, el aceite goleará las aspas del miembro impulsado con gran fuerza, haciendo que el aceite tienda a rebotar, en particular, hacia la sección central de los miembros. Este esfuerzo de rebote reduce considerablemente la eficiencia del convertidor de par; por tanto, para evitar esta situación, se coloca un anillo guía partido en las secciones tanto del impulsor como de la turbina del convertidor de par (figura 12). Este arreglo no permite que el aceite rebote y por lo tanto evita la turbulencia; esto permite una mayor eficiencia del convertidor de par.

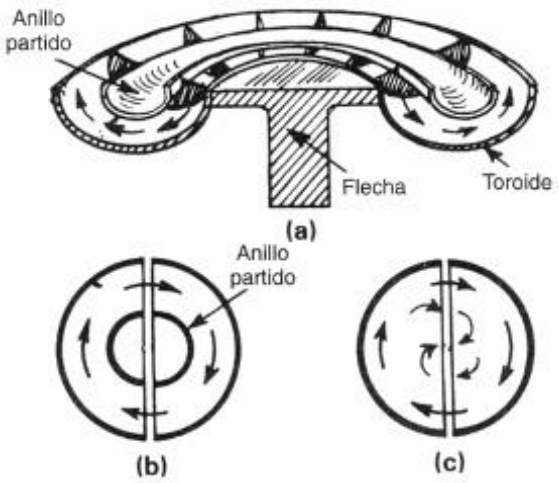


Figura 22

Multiplicación del par motor

La multiplicación del convertidor de par se lleva a cabo sólo cuando la bomba gira más rápidamente que la turbina. La multiplicación del convertidor de par es el resultado de la velocidad (energía cinética) que imparte al aceite por el giro de la bomba, más la velocidad del aceite redirigido de regreso a la bomba por acción del estator. Por tanto, parte del aceite cede su energía al golpear las aspas de la turbina. Como todavía queda energía cinética restante en el aceite después de golpear la turbina, es redirigido por las

aspas del estator de regreso a la bomba, en donde entra a la bomba para ayudar a su giro, multiplicando de esta manera el par motor.

Mientras mayor sea la resistencia de la turbina al movimiento inicial, mayor será la velocidad del flujo del vórtice y eso dará por resultado una mayor multiplicación del par motor. Por el contrario, mientras menor sea la resistencia de la turbina para girar, menor será el flujo del vórtice y por tanto, menor será la multiplicación del par motor.

Cuando la velocidad de la turbina se acerque a la de la bomba (rpm del motor), disminuye el flujo del vórtice, estando la transición real del flujo por vórtice a flujo giratorio relacionada con la aceleración de la turbina. El convertidor de par ahora en efecto se vuelve un acoplamiento fluido.

Patrones de flujo de aceite

Para comprender la multiplicación hidráulica del par motor, refiérase a la figura 13; y luego consideremos tres términos:

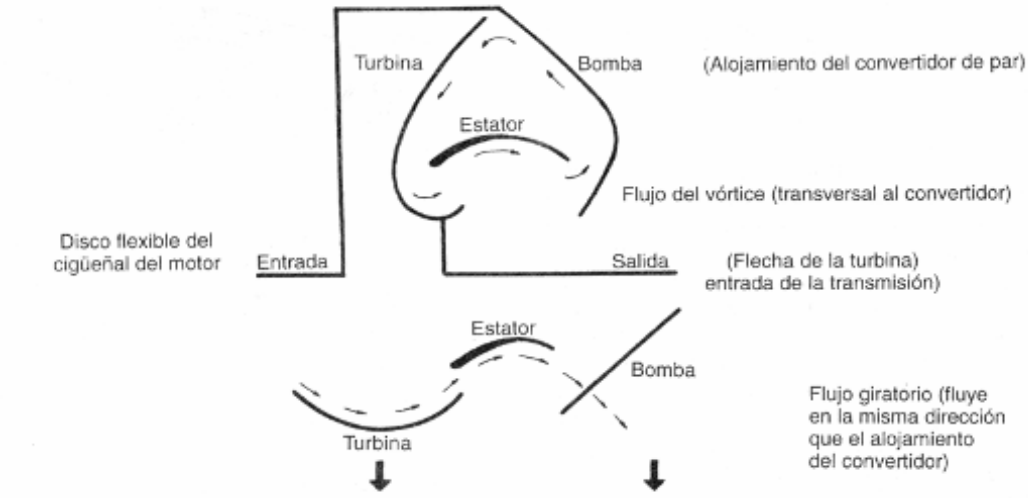


Figura 23

1. **Energía cinética:** es la energía que opone el aceite en movimiento
2. **Flujo giratorio:** es el flujo de aceite alrededor de la circunferencia del convertidor de par
3. **Flujo de vórtice:** es el flujo de aceite a través del convertidor del par

Energía cinética: Cuando una fuerza actúa sobre un cuerpo, el trabajo que ejecuta la fuerza es igual a la energía del movimiento (energía cinética) ganada por ese cuerpo, si no hay fricción u otra pérdida de energía.

La multiplicación del par motor de entrada es el resultado de la energía cinética impartida al aceite por la bomba (impulsor), más la energía cinética que entra a la bomba proveniente del estator. Mientras mayor sea la resistencia al giro que ofrezca a la turbina, mayor será la velocidad del flujo de vórtice del aceite que circula en el interior

del convertidor, y mayor será la multiplicación del par motor. A la inversa, mientras menor sea la resistencia que ofrezca la turbina, menor será la velocidad de flujo de vórtice, y menor será la multiplicación del par motor.

Recuerde que el alojamiento del convertidor de par (bomba) está unido con pernos al cigüeñal del motor a través del disco flexible. La turbina del convertidor de par está unida por medio de estrías a la flecha de la turbina, que está conectada al embrague delantero dentro de la transmisión; por tanto, mientras mayor sea la carga en el vehículo, mayor deberá ser la velocidad del motor para crear suficiente flujo de vórtice dentro del convertidor de par para poder vencer esta carga.

Flujo giratorio y de vórtice: Tan pronto como se arranca el motor, el alojamiento del convertidor de par girará a la velocidad del motor. Esto hace que gire el aceite alrededor de la circunferencia del convertidor (flujo giratorio). Como la turbina está conectada a la carga, se resiste a girar cuando el aceite golpea sus aspas. Debido a esta resistencia y a la forma de las aspas, el aceite sigue una segunda trayectoria de recorrido transversal, que se conoce como flujo de vórtice. Mientras mayor sea la resistencia de la carga transmitida por la turbina, mayor será el flujo de vórtice.

Se puede considerar el convertidor de par como un punto de apoyo flotante parecido al principio de palanca que se explica en los principios básicos de los engranes. Puesto que no hay conexión directa entre bomba y turbina, el flujo de vórtice, o el ángulo al que sale el aceite de la turbina y entra al estator y la bomba, aumenta y disminuye en relación con las velocidades relativas entre la turbina y la bomba.

Las aspas del convertidor o alabes son curvas para facilitar el flujo correcto el vórtice. Los alabes de la bomba son curvas hacia un lado y las de la turbina al otro. Los alabes de la turbina son más curvas que las de la bomba, para permitir cambiar la dirección del aceite que regresa al estator, para ayudar al giro de la bomba, que está en efecto conectada sólidamente al alojamiento del convertidor de par, al disco flexible y al cigüeñal del motor.

La figura 24 es una vista sección transversal simplificada de dos miembros de un convertidor de par, que muestra con flechas gruesas la manera en que circula el aceite entre los alabes de los miembros impulsores e impulsado. En operación, el aceite es forzado por el alabe 1 hacia abajo al alabe 2, y así impulsa el alabe 2, como lo muestran las flechas pequeñas. Luego el aceite pasa alrededor y detrás el anillo guía partido y nuevamente al miembro impulsor, o entre los alabes 1 y 3. Luego es lanzado contra el alabe 4 y continúa este patrón de circulación, pasando continuamente de un miembro al otro.

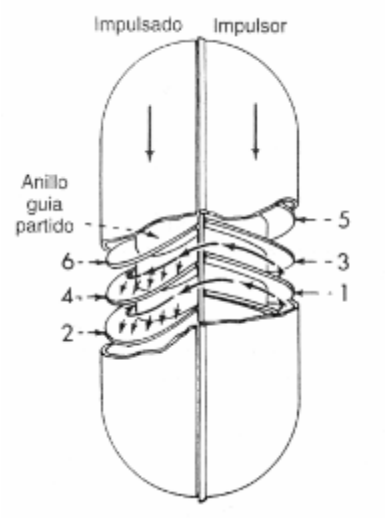


Figura 24

Acción del estator

El estator o miembro de reacción es soportado en su maza estriada que acopla con las estrías de un manguito o flecha estacionaria (estator). Esta flecha es parte del alojamiento de la bomba de aceite de transmisión, que está unida al alojamiento de la transmisión estacionaria. Sin embargo, entre la pista interior estriada del estator y la maza exterior hay un juego de rodillos, que se pueden ver en la figura 25.

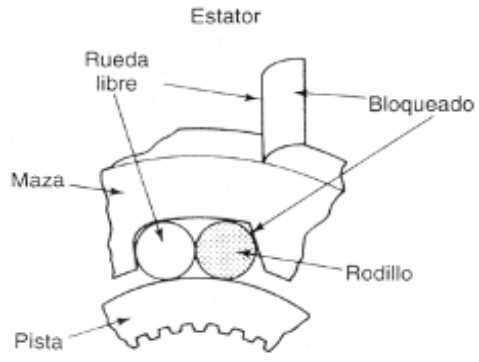


Figura 25

El objeto de los rodillos es permitir que el estator permanezca estacionario durante las condiciones de baja velocidad y multiplicación de alto par de torsión, y al mismo tiempo permite que gire libremente cuando la turbina y la bomba están girando básicamente a la misma velocidad. Este estado, conocido como punto de acoplamiento, ocurre a altas velocidades del vehículo en carretera. El espacio entre la pista y la maza es cónico para que el rodillo se pueda mover de lado a lado. Para evitar que los rodillos queden sueltos Hay insertado un juego de resortes ligeros como fuelle de acordeón, en el extremo ancho de la ranura cónica. Cuando el rodillo es forzado hacia la medida pequeña de la ranura, se atorará o bloqueará, evitando por tanto el giro del estator. Cuando los rodillos son forzados hacia el extremo ancho de la ranura, el estator podrá girar libremente.

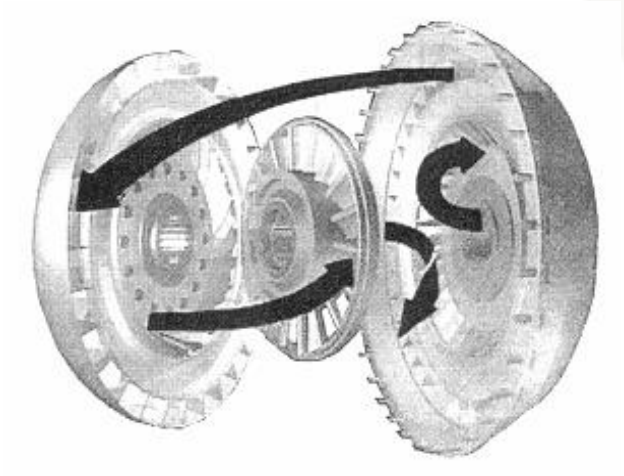


Figura 26

La figura 26 muestra que a baja velocidad y a altas demandas de par motor, el fluido que sale de la turbina golpea la cara delantera de las aspas del estator. Esta acción bloquea el estator en su embrague de rueda libre. El cambio de dirección del fluido de las aspas curvas del estator es dirigido de regreso a la bomba del lado de la turbina, donde la entrada al estator es más ancha que el lado de la salida. Esta reducción del tamaño de la trayectoria de flujo del fluido lo acelera por el estator de regreso hacia las aspas de la bomba. El estator es, por tanto, el elemento clave dentro del convertidor del par, que permite transmitir un par motor más elevado que el que recibe del motor.

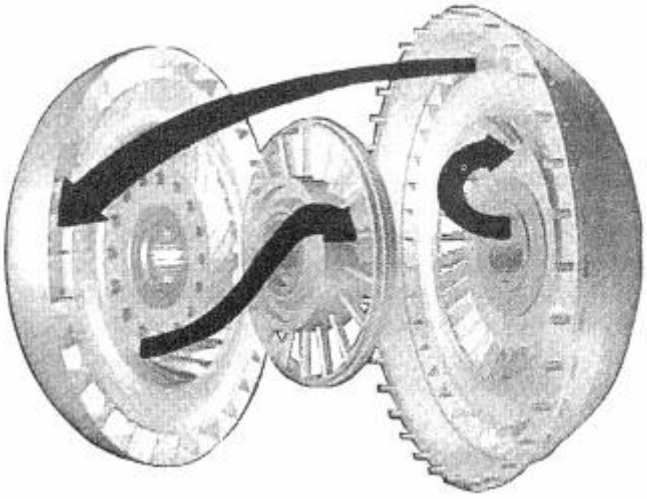


Figura 27

La figura 283 muestra que durante la operación del cambio ascendente de la transmisión, el giro de la turbina se acerca a la velocidad de la sección de la bomba del convertidor del par. Cuando esto ocurre, el fluido que sale de los alabes de la turbina empieza a golpear la parte trasera de las aspas del estator. Esta fuerza del fluido hace que los rodillos del estator se muevan hacia el extremo ancho de la ranura de la pista, y el estator girará libremente en la misma dirección de giro que los conjuntos de bomba y de turbina del convertidor de par. Con todos los miembros girando a la misma

velocidad, el convertidor de par en efecto se convierte en una rueda libre de fluido con el flujo giratorio ocurriendo sólo interiormente para proporcionar una transferencia suave de potencia a las velocidades más altas del vehículo en carretera.

Si aumenta la carga del vehículo, como cuando sube por una pendiente, disminuye la velocidad de las ruedas. Con una conexión mecánica directa de las ruedas a la transmisión, también disminuye la velocidad de la turbina del convertidor del par. Con la turbina moviendo ahora más lentamente la bomba y el estator, el fluido se dirige nuevamente contra la cara delantera de las aspas del estator. Cuando el estator trata de girar hacia atrás, el embrague del rodillo se queda atorado entre la pista del estator y la maza, fijándolo y permitiendo automáticamente que ocurra de nueva cuenta el flujo de vórtice. El flujo de vórtice proporciona el cambio de dirección del fluido a través del estator para dar la multiplicación del par motor. Cuando disminuye la velocidad del vehículo, también ocurre un cambio descendente automático a una velocidad menor.

Reacción del estator

Como resultado de la acción del estator y la turbina, el convertidor de par está diseñado para funcionar como un sistema de palanca variable. El ángulo del fluido que sale de la turbina al estator será mayor cuando la diferencia de velocidad entre el alojamiento de la bomba de convertidor de par y la turbina sea la mayor (condiciones de carga pesada y velocidad estacionaria o baja). Cuando se acelera la velocidad de la turbina a una velocidad mayor a la del vehículo, el ángulo del flujo del fluido entre turbina y estator se hace menos; por tanto, mientras más inclinado sea el ángulo del flujo del fluido, más larga será la palanca de éste. La reacción resultante seguirá una de las tres leyes de movimiento de Isaac Newton: por cada acción hay una reacción igual y opuesta. La figura 18 permite comparar estos eventos dentro del convertidor de par.

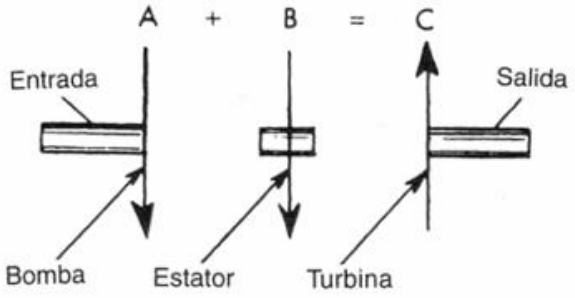


Figura 28

Relación de par motor de parada

La cantidad de multiplicación de par motor que puede producir cualquier conjunto de convertidor de par se basa en el tamaño físico del convertidor, en la cantidad de aspas de turbina o de estator y los ángulos o curvaturas de las diferentes aspas. Esta característica de diseño determina lo que comúnmente se refiere como la relación de par motor de parada del convertidor de par. Por ejemplo, en un par de motor de parada 2:1, el convertidor de par es capaz de entregar el doble del par motor del producido por el motor. Un par motor de parada de 3:1 proporcionará tres veces el par de torsión del motor. Sin embargo, la multiplicación máxima de par ocurre sólo al pararse la turbina. Por ejemplo, con la transmisión colocada en velocidad, la turbina del convertidor de par

se conecta a través de dos juegos de embragues a las ruedas del vehículo. Si se aplican los frenos de servicio del vehículo y están bloqueadas las ruedas del mismo, acelerar el motor a sus rpm máximas impulsaría el flujo del vórtice dentro del convertidor de par a su máximo. Por tato, el par motor máximo se produce al pararse la turbina. Sin embargo, si se liberan los frenos, la turbina empezará a acelerarse. Por tanto, la única ocasión en que puede ocurrir el par motor máximo a través del convertidor de par es en parada (turbina sujeta). Compare esta acción a tratar de aflojar una tapa muy apretada en un recipiente. ¿Cuándo se está ejerciendo el mayor torcimiento o por de torsión? Justo antes que se libere la tapa.

Tipos de convertidores:

- Convertidor de torque con embrague en el estator
- Convertidor de torque con embrague de traba (lock-up)
- Convertidor de torque con embrague en el impelente (IC)
- Convertidor de torque de capacidad variable.
- Divisor de par.

Convertidor de torque con embrague en el estator.

El embrague en el estator se ocupa generalmente en equipos que necesiten trasladarse distancias mayores a las normales, como por ejemplo cambiarse de frente de trabajo, si recordamos este accesorio traba el estator cuando existan grandes diferencias de velocidades entre el impelente y la turbina, pero cuando las velocidades se aproximen como en el caso del traslado a mayor velocidad, trabajara junto con el embrague de traba Lock-up para evitar impactos del aceite en el estator cuando el equipo se encuentre en modo mando directo evitando también perdidas energéticas en forma de calor cuando estos impactos se producen.

La traba del estator puede ser mediante un mecanismo mecánico llamado rueda libre, que permite un giro uni-direccional del estator, mediante el uso de levas, resortes y polines, este mecanismo también es llamado trinquete.

El otro mecanismo es mediante el uso de un embrague húmedo que es un paquete de embragues que constan de discos y platos, trabados o liberados mediante el accionamiento de un pistón hidráulico, según se requiera, trabajar en mando directo o mando convertidor.

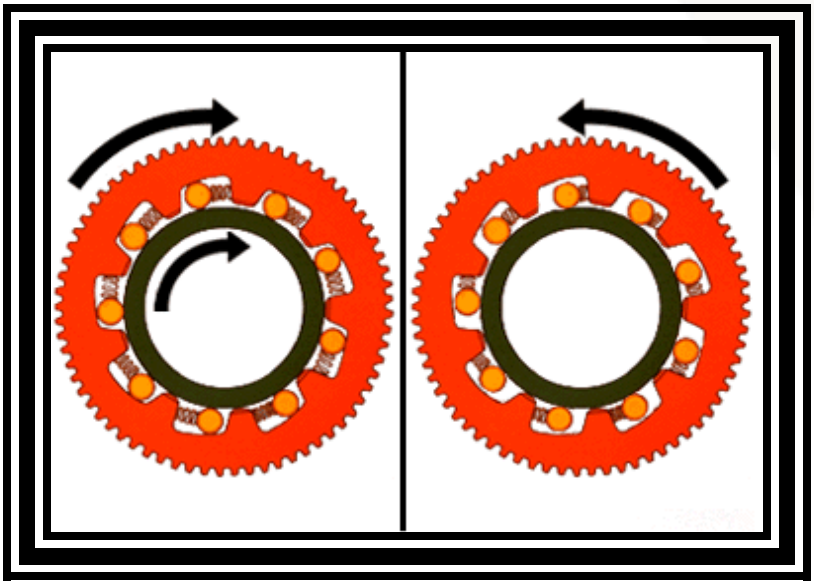


Figura 29

Mecanismo de rueda libre o trinquete (Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Convertidor de torque con embrague de bloqueo (lock-up)

Como normalmente no hay conexión mecánica directa entre la bomba de convertidor de par y los elementos de la turbina, la turbina siempre girará más lentamente que la bomba (impulsor). Por supuesto esto se debe al deslizamiento entre estos dos componentes, de acuerdo con el principio de transferencia fluida de potencia, que da por resultado menos economía de combustible más pobre. Para mejorar no solamente la economía de combustible del vehículo sino también para proporcionar una conexión mecánica sólida o para que el convertidor de par use el freno de compresión del motor, se usa un conjunto de embrague de bloqueo del convertidor de par. La figura 19 ilustra de una forma simplificada el arreglo básico de los componentes del embrague de bloqueo de convertidor de par. La cubierta del convertidor de par queda frente al volante del motor. La placa de respaldo se encuentra directamente frente de la turbina y está unida con pernos a la cubierta delantera del convertidor de par; por tanto, la placa de respaldo siempre gira a la velocidad del motor. Un amortiguador torsional (disco de embrague) y una placa de embrague de bloqueo están conectados directamente al conjunto de la turbina. El objeto de este amortiguador torsional es ayudar a reducir la vibración y los golpes durante el acoplamiento del embrague de bloqueo. El pistón del embrague de bloqueo está acoplado a la cubierta delantera del convertidor de par; por tanto, siempre gira a la velocidad del motor.

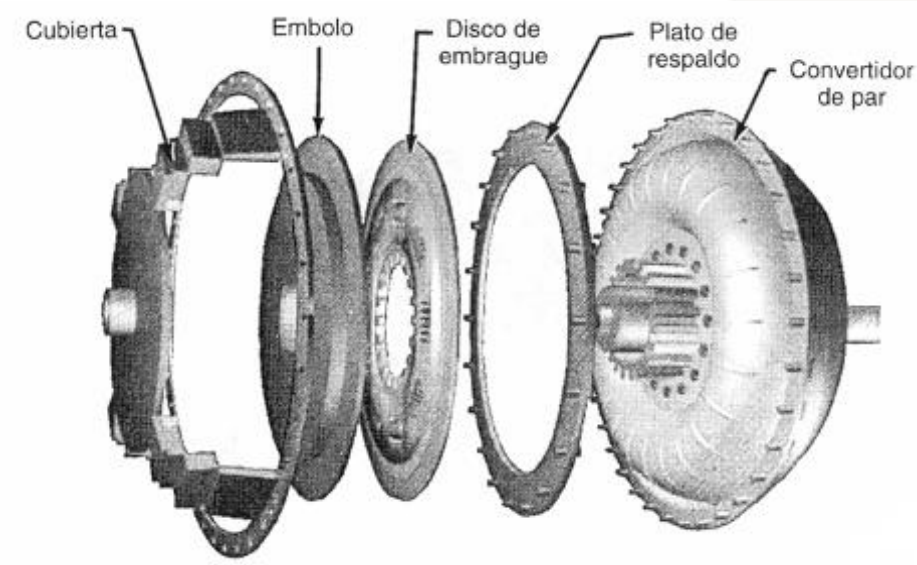


Figura 30

Se requiere fuerza para cambiar la dirección o velocidad del flujo de aceite. Por ejemplo, cuando el aceite fluye por tal conducto curvado como se muestra a continuación, la velocidad del flujo variará en la entrada y salida como lo indica la figura siguiente. La fuerza proporcional al equilibrio entre las velocidades del flujo en la entrada y salida actuara en el aceite y su fuerza de reacción hará que la manguera sea empujada en la dirección opuesta. Las fuerzas que actúan en el aceite y tubería aumentaran en proporción al caudal. Cuanto mayor sea el caudal, mayores serán las fuerzas.

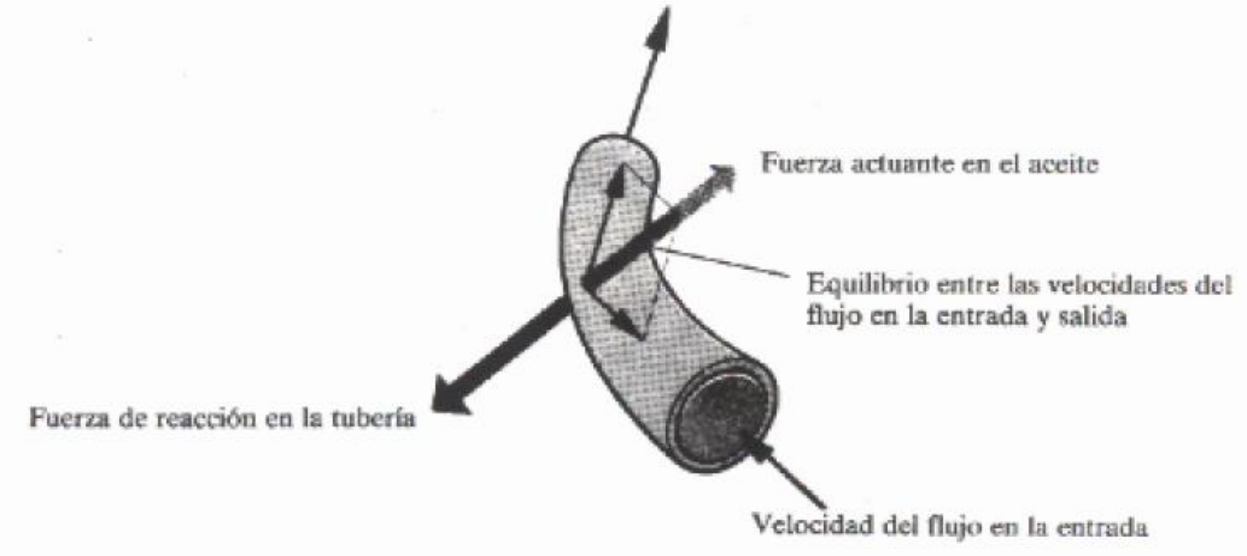


Figura 31

Además del equilibrio entre las velocidades del flujo, debe tenerse en cuenta el efecto de las presiones en la entrada y salida para conseguir una descripción más precisa. No

obstante aquí solo se considera la velocidad del flujo para simplificar las explicaciones y facilitar su entendimiento.
La velocidad del flujo tiene velocidad y dirección. Aquí, la velocidad del flujo está indicada por una flecha, la velocidad por el largo de la flecha y la dirección por la punta de la flecha, respectivamente. El equilibrio entre las velocidades del flujo, puede obtenerse de la misma forma que en el equilibrio entre fuerzas.

El par de rozamiento depende de:

- Fuerza ejercida
- Coeficiente de rozamiento
- La geometría de las superficies

El lock up es un tipo de embrague de discos múltiples sumergidos en aceite, su aplicación debe ser modulada para evitar golpes en el tren de potencia, bajo esta condición el camión, pasa de mando convertidor a mando directo, puesto que, el equipo ya venció la oposición de la inercia y ahora necesita velocidad.

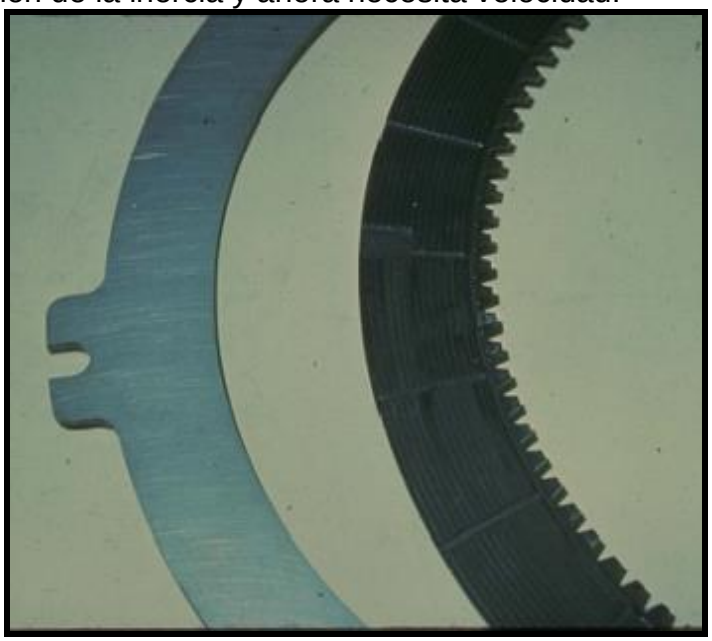


Figura 32

Disco y Platos de Fricción

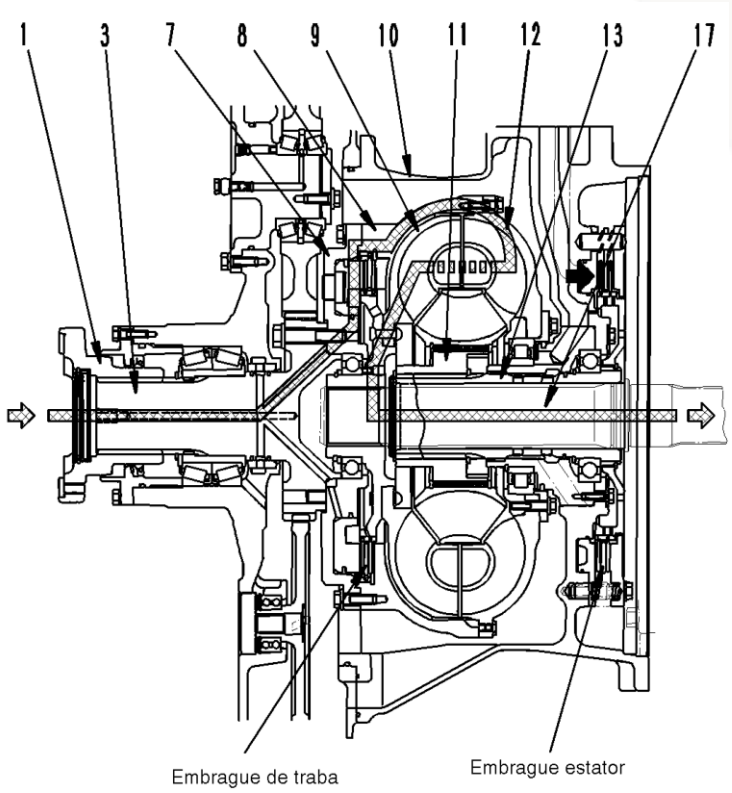


Figura 33

Convertidor de torque con embrague de traba en la turbina y en el estator, de un tractor D375 (Por gentileza de Komatsu Cummins)

Embrague de traba en la posición OFF, embrague del estator en la posición de ON, (condición mando convertidor)

En la figura anterior, cuando el embrague de traba está en OFF, está cortada la conexión entre la caja propulsora (8) y la turbina (9) y cuando el embrague del estator está en ON, la caja trasera (10) y el eje del estator (13) están conectados; de manera que, el estator (11) está trabado y el convertidor de torsión proporciona las funciones normales de un convertidor de torsión. La potencia generada por el motor pasa a través del amortiguador y de la unión universal y es transmitida al acople (1). El eje de entrada (3), la caja del embrague (7), la caja propulsora (8) y la bomba (12) giran como una unidad. La fuerza motriz procedente de la bomba emplea aceite para hacer girar la turbina (9) y es transmitido al eje de entrada de la transmisión (17) para formar una unidad junto con la turbina.

Embrague de traba ON, embrague del estator OFF (condición mando directo)

En la figura anterior, cuando el embrague de traba está en ON [activado], la caja propulsora (8) y la turbina (9) se encuentran conectadas para formar una unidad. Cuando el embrague del estator está en OFF [desactivado], la conexión entre la caja trasera (10) y el eje del estator (13) se corta, de manera que el estator (11) sigue la rotación de la bomba (12) y turbina (9). La potencia generada por el motor pasa a través del amortiguador y de la unión universal y es transmitida al acople (1). El eje de entrada (3), la caja del embrague (7), la caja propulsora (8) y la bomba (12) giran como una

unidad. Además, la caja propulsora y la turbina (9) están conectadas por el embrague, de manera que el aceite no se usa. La fuerza motriz es transmitida directamente a la turbina y al eje de entrada de la transmisión (17).

Convertidor de torque con embrague en el Impelente:

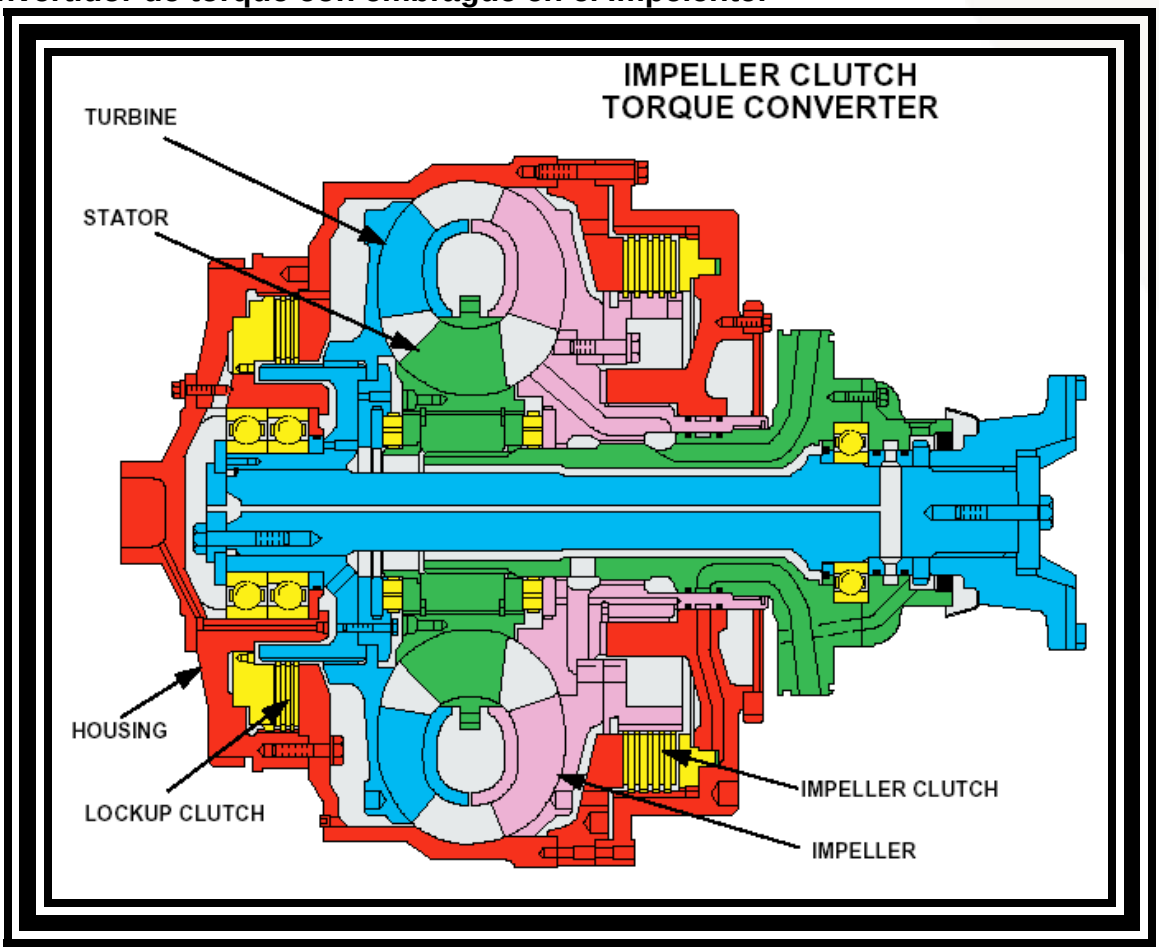


Figura 34

Convertidor de torque con embrague en el impelente (Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

La imagen anterior nos muestra un convertidor de torque que además de tener embrague de traba o lock-up, se caracteriza por tener un embrague en el impelente. Este tipo de convertidores generalmente es usado en cargadores frontales. El embrague en el impelente se utiliza para limitar el flujo de potencia hacia el sistema de propulsión, con este accesorio se puede obtener lo siguiente:

- Evitar que los neumáticos patinen y se desperdicie energía de esta forma.
- Mejor cuidado de los neumáticos al no patinar.
- La energía del motor será re direccionada cuando sea necesario al sistema hidráulica, esta condición se presenta durante el proceso de carguío de material

la energía que se desperdiciaba al patinar los neumáticos, será ocupada en el giro de las bombas del sistema hidráulico.

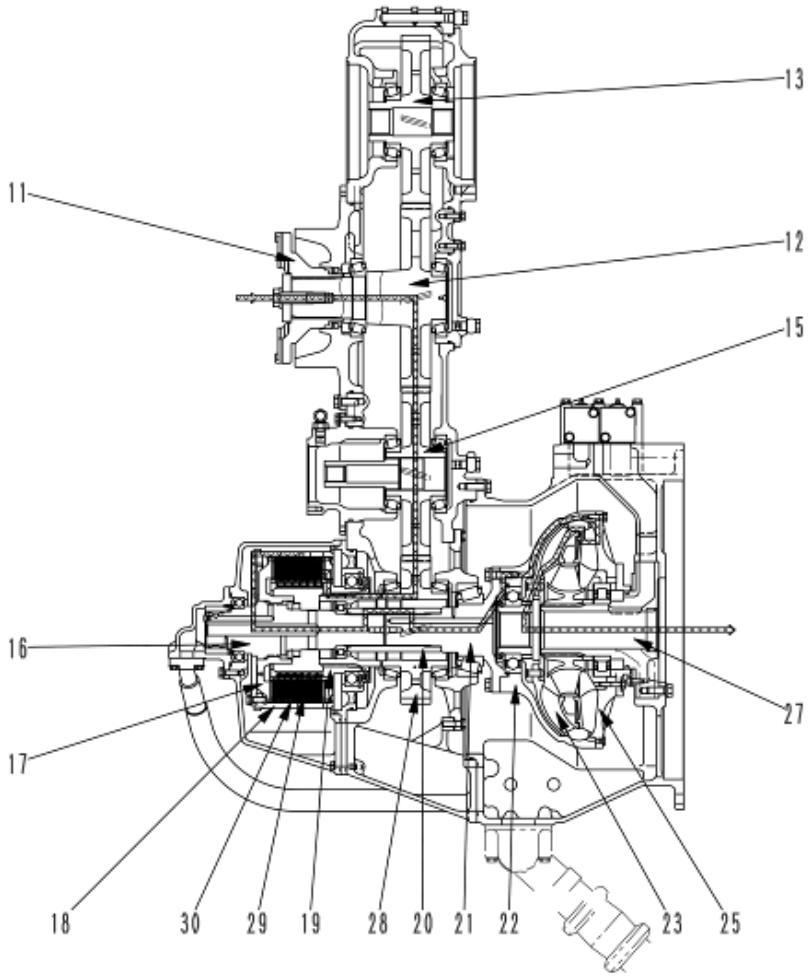


Figura 35

(Por gentileza de Komatsu Cummins)

El convertidor de torsión está instalado entre el amortiguador y la transmisión. La potencia proveniente del amortiguador es transmitida a través del eje de mando superior hacia el acople (11). La velocidad de rotación es incrementada con el engranaje de mando (12), el engranaje libre (15), y el engranaje impulsado (28) del PTO, luego es transmitida hacia el tambor interior del embrague modulado (19). Si la presión de aceite es aplicada en la parte trasera del pistón del embrague modulado (17), esta comprime los discos del embrague modulado (29) contra el plato del embrague modulado (30) para transferir la potencia hacia el tambor externo del embrague modulado (18).

La potencia transmitida por el tambor externo (18) del embrague modulado es transmitida luego a través del eje de salida (16) del embrague modulado y del acople (20) hacia el eje de entrada (21) del convertidor de torsión. Debido a que el eje de entrada (21) del convertidor de torsión, la caja de mando (22) y la bomba (25) están

unidos por medio de tornillos, ellas giran por la potencia proveniente del embrague modulado. La potencia de la bomba (25) gira la turbina (23) para impulsar el eje de entrada (27) de la transmisión, usando el aceite como medio. La potencia del acople (11) es también usada para impulsar las bombas hidráulicas, a través del engranaje de mando (12), del engranaje del PTO (13), o del engranaje libre (15).

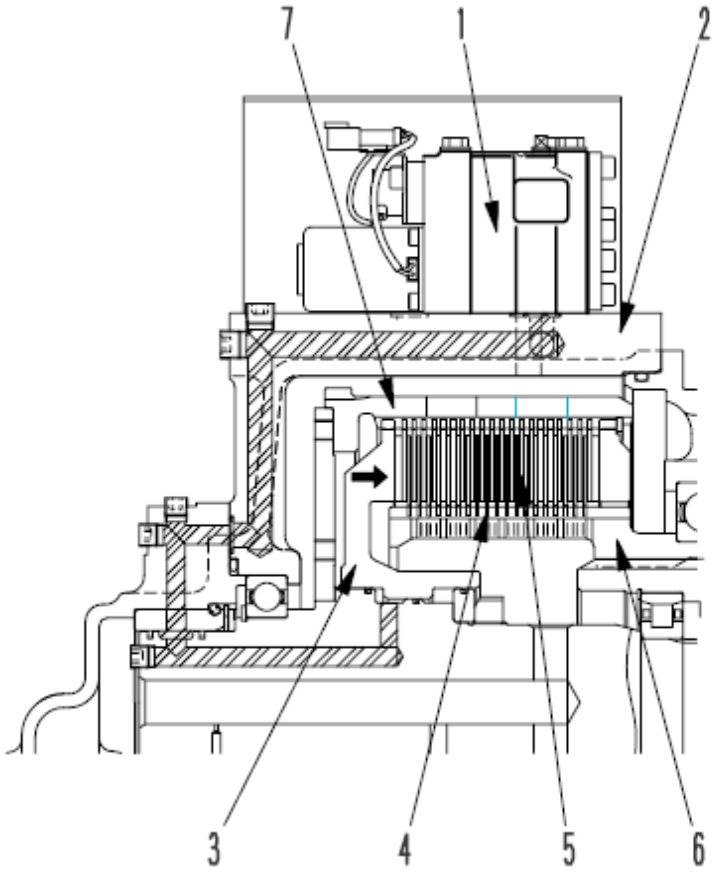


Figura 36

(Por gentileza de Komatsu Cummins)

Embrague modulado

Descripción

El embrague modulado está instalado entre el PTO y el convertidor de torsión. El embrague puede ser engranado, o deslizado al ajustar de la presión de aceite del embrague por medio de la válvula de modulación de control electrónico (ECMV) La potencia transmitida por el convertidor de torsión puede ser reducida por medio del deslizamiento del embrague.

Operación
Cuando el embrague es engranado
El aceite enviado desde la válvula de modulación ECMV (1) para el embrague modulado fluye a través del pasaje de aceite de la caja del embrague modulado (2) hacia el pistón (3) para moverlo hacia la derecha. Si el pistón (3) se mueve y crece la presión de aceite del embrague, la presión del pistón (3) incrementa y comprime los discos (4) contra el plato (5) para engranar el tambor interior (6) con el tambor exterior (7). Por lo tanto, toda la potencia transmitida por el tambor interior (6) es transmitida hacia el tambor exterior (7). Cuando el embrague es deslizado. Si el controlador envía la señal de reducir la presión del aceite del embrague, la válvula de modulación de control electrónico (ECMV) (1) para el embrague modulado reduce la presión del aceite. Si se reduce la presión del aceite del embrague, se reduce también la presión del pistón (3) y los discos (4) se deslizan en el plato (5), luego el tambor externo (7) gira más lentamente que el tambor interno (6). Como resultado, se reduce la potencia transmitida.

La potencia transmitida depende de la relación de deslizamiento del embrague y la relación de velocidad del convertidor de torsión. Relación de Resbalamiento (1 - rpm de salida/rpm de entrada) x 100 (%)

1.2 Convertidor de torque de capacidad Variable.

Este convertidor se caracteriza por cumplir funciones similares al que tiene un embrague en el impelente, la diferencia radica en que este tiene un impelente interior que siempre está conectado y otro exterior que será conectado o no dependiendo si se requiere más o menos propulsión, esto al igual que el anterior, dependerá de la condición de trabajo que se encuentre el equipo, (carga o traslado de material). Este sistema permite un ahorro de neumáticos y mayor eficiencia del sistema hidráulico. El operador puede ajustar la capacidad de par variando la presión hidráulica a la impelente externa para obtener mejor rendimiento del equipo.

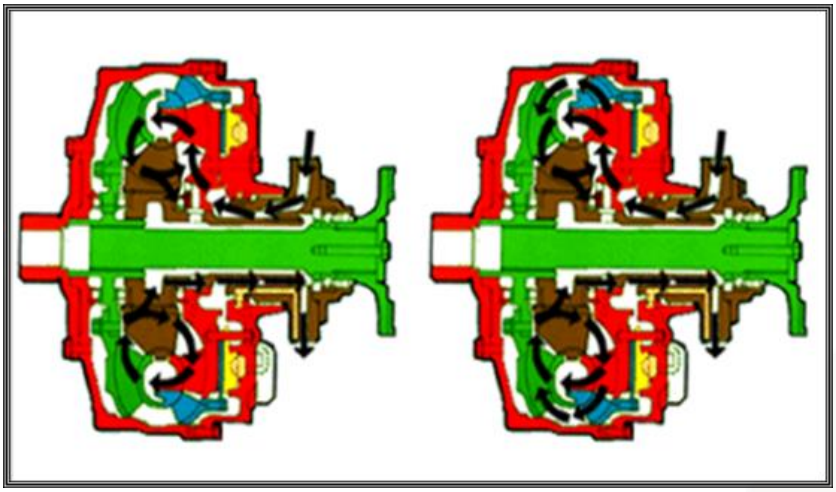


Figura 37

Convertidor de torque de capacidad variable (Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Divisor de par:

El Divisor de par es en su conjunto, es un convertidor de par, pero la diferencia es que el divisor de par tiene un juego de engranajes planetarios, es así que la fuerza del motor se multiplica aún más, esto gracias el principio de la relación de transmisión en los engranajes.

Este mecanismo va acoplado a la volante, es su defecto va sin activarse en marcha normal, pero al momento en que el equipo entra en trabajo, realizando arrastre, o desprendimiento de rocas, el mecanismo planetario entra en trabajo.

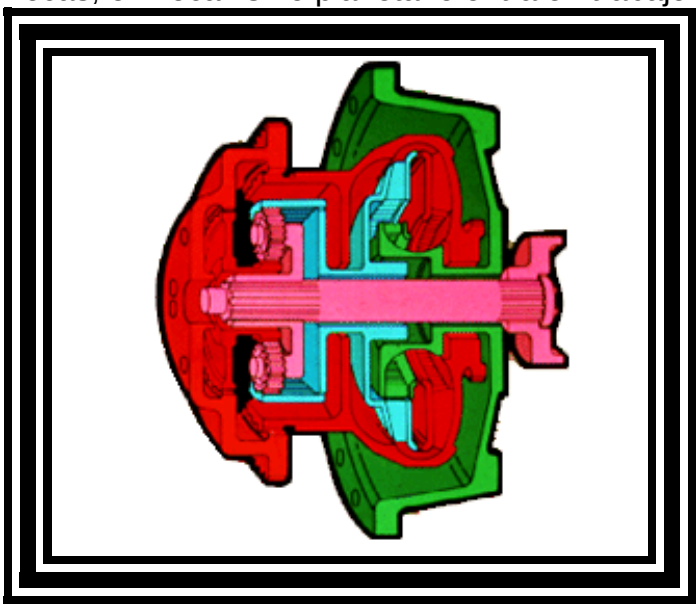


Figura 38

Diagrama en corte del divisor de par (Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Esto debido a que mientras mayor sea la carga en la máquina, el porta-engranajes y el eje de salida disminuyen su velocidad. Esto da comienzo al movimiento relativo de los engranajes del juego de engranajes planetarios.

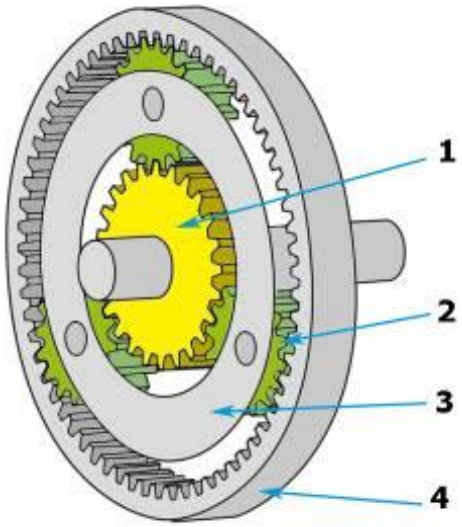


Figura 39

Basado en la figura anterior, una reducción planetaria se compone de:

- Un piñón central (solar) (1) que gira junto con el volante y el impelente
- Satélites (2)
- El porta satélites (3) unido al eje de salida del convertidor
- Una corona, planetario (anular) exterior de dentado interior (4) unida a la turbina

Dependiendo si detenemos o no alguno de sus elementos, podemos tener las siguientes 3 combinaciones posibles mostradas en el esquema siguiente, sin embargo para la aplicación específica del divisor de par, solo se producen las condiciones A y C mostradas en el siguiente esquema.

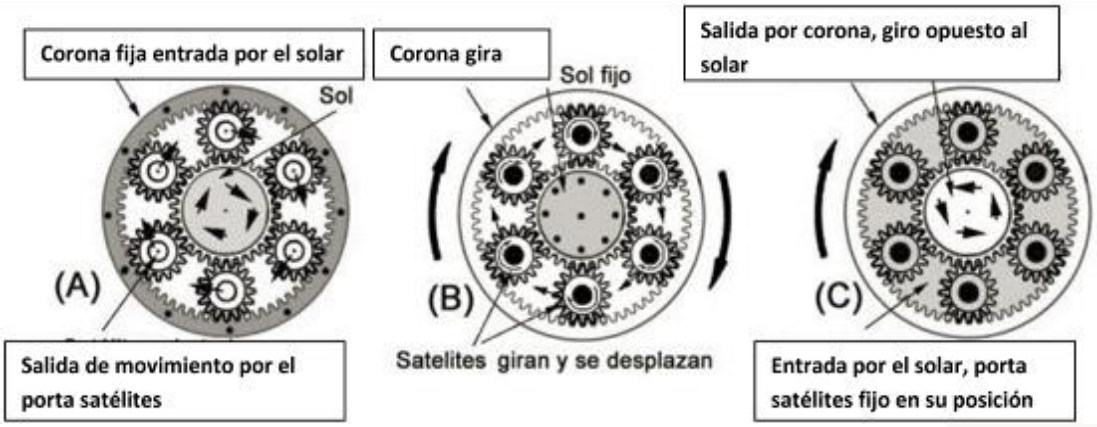


Figura 40

Condición A saliendo del reposo
Justo antes de salir del reposo la turbina (corona) se encontraba detenida, el movimiento ingresa por el solar (unido al volante e impelente), en la medida que el aceite impacta la turbina y esta tiene velocidad cero, el torque será incrementado como un convertidor convencional, al cual se le agregara el incremento de torque generado por la reducción planetaria, provocando la salida de movimiento por el porta satélites (eje de salida del convertidor) con un toque mayor al generado por un convertidor convencional.

Condición C mayor resistencia mayor es el torque
Como las cadenas del tractor están unidas mecánicamente con el eje de salida del convertidor (porta satélites), si la carga que debe mover el tractor es muy elevada, las codenas no se moverán, tampoco el eje de salida del convertidor y con ello el porta satélites tendrá velocidad igual a cero, como el movimiento siempre estará ingresando por el solar y en un mismo sentido de giro, en ese momento de la operación se estarán dando las condiciones mostradas en el esquema anterior en la condición C, esto implica que el anular (turbina) cambie el sentido de rotación mientras el porta satélites tenga velocidad igual a cero (cadena de tractor no se mueve).

Entendiendo que mientras mayor sea la diferencia de velocidades entre la turbina y el impelente, mayor será la fuerza de impacto del aceite en la turbina y con ello el torque generado, este convertidor a diferencia del convertidor estándar, puede generar una mayor diferencia de velocidades entre la turbina y el impelente gracia a la reducción planetaria agregada, ideal para equipos que necesitan mover grandes cargas y desarrollar alto torque.

Cuando no hay carga:
Cuando NO HAY CARGA, los componentes del sistema de engranaje planetario rotan como una unidad a la misma velocidad. Debido a que el engranaje planetario y el impulsor se conectan al volante, siempre rotarán a la velocidad del motor. Cuando el impulsor rota, dirige al aceite contra los alabes de la turbina, haciendo que la misma rote. La rotación de la turbina hace que la corona dentada rote. Cuando no hay carga, los componentes del sistema de engranaje planetario rotan como una unidad a la misma r.p.m. Los engranajes planetarios no rotarán sobre sus ejes.

1.3 Válvulas de control y modulación del convertidor de torque

Válvula de alivio de entrada y salida del convertidor de torque
Las válvulas de alivio de entrada y salida del convertidor de torque están instaladas ´por lo general en la parte exterior de la caja del convertidor en el caso de los camiones de fuera de carretera.

Válvula de Alivio de Entrada

La válvula de alivio de entrada, controla la presión máxima del aceite que llega al convertidor, el aceite viene de la sección de carga del convertidor el aceite llega a través del filtro. La válvula de alivio de entrada asegura que la presión máxima del aceite que entra al convertidor no exceda la presión máxima de protección del convertidor.

Precaución: Cuando el aceite esta frío, la presión máxima que entra al convertidor de torque por ningún motivo debe de sobrepasar la presión especificada. Presiones superiores a los valores máximos indicados causarán daños al convertidor de torque.

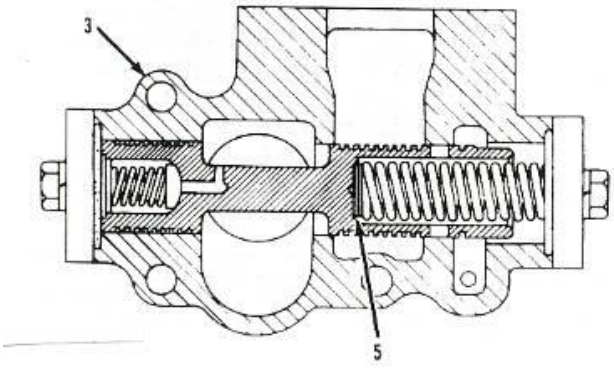


Figura 41

Válvula de entrada (Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Válvula de Alivio de Salida

La válvula de alivio de salida asegura que la presión del aceite que sale del convertidor de torque no exceda los valores especificados, esta válvula controla la presión interna del convertidor, que es la encargada de provocar el acople hidráulico.

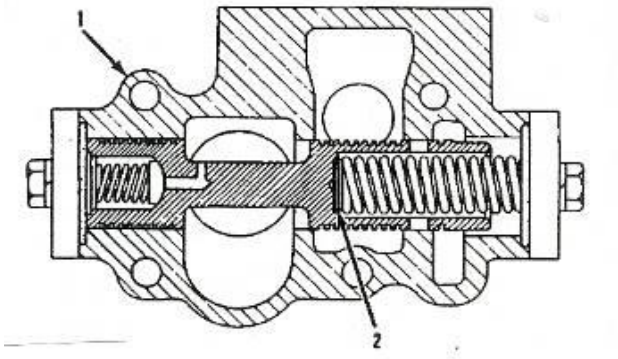


Figura 42

Válvula de salida del convertidor (Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Válvulas de control de modulación de embragues del convertidor.

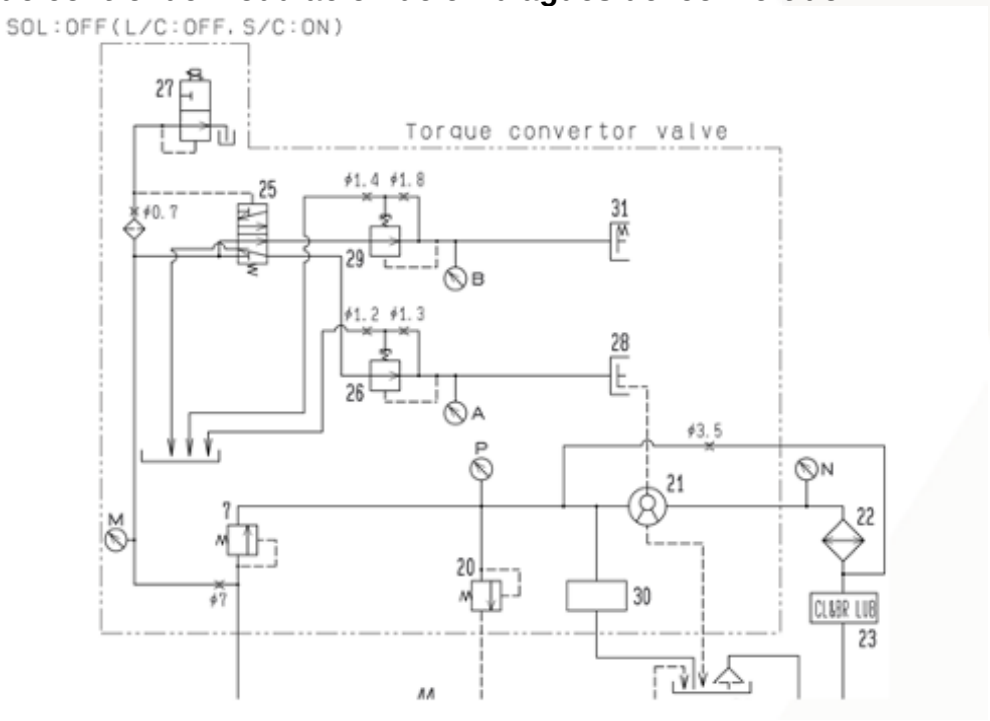


Figura 43

Circuito de modulación de embragues del convertidor de torque de tractor D375 (Por gentileza de Komatsu Cummins)

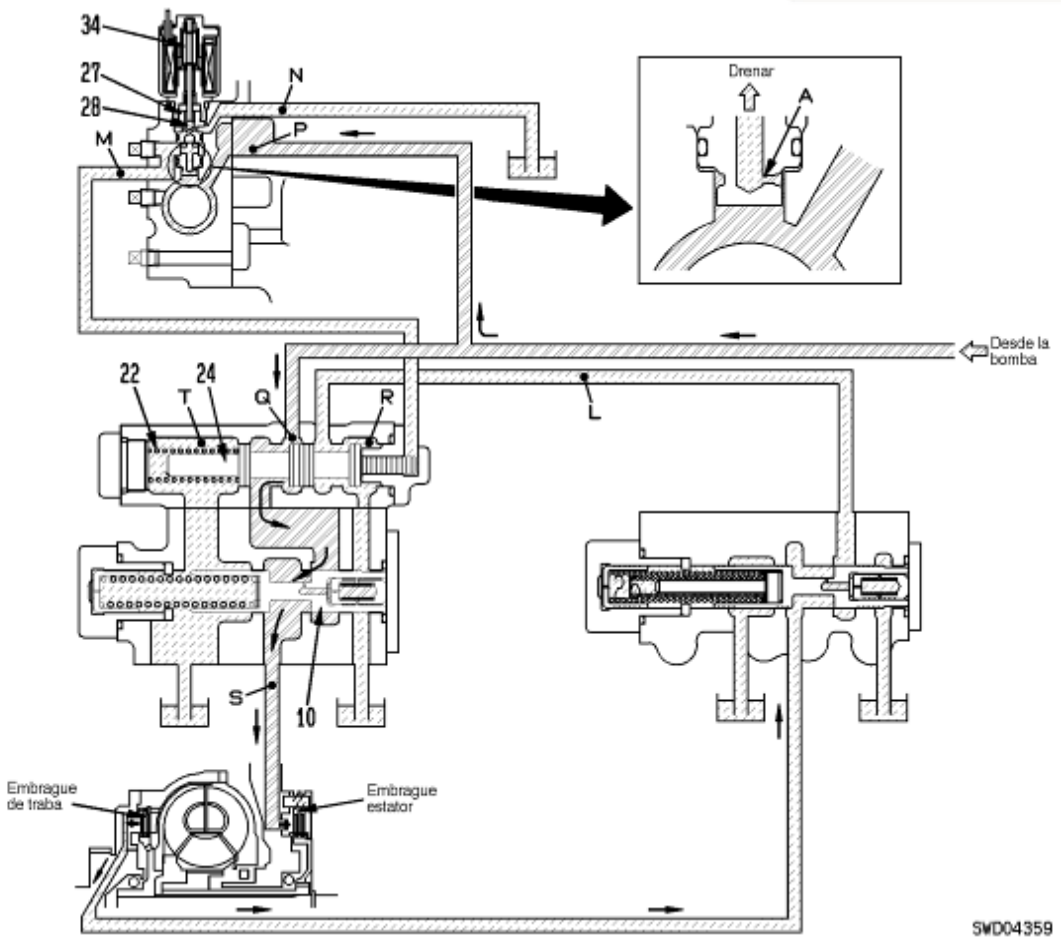


Figura 44

Diagrama ortogonal del circuito de modulación de embragues del convertidor de torque de tractor D375 (Por gentileza de Komatsu Cummins)

Funcionamiento en modo traslado

Cuando la máquina entra en el modo de traslado por convertidor de torsión, la válvula solenoide está desactivada para hacer regresar hacia arriba el émbolo (34) mediante la presión del aceite y de esa forma abriendo los asientos de la válvula (27) y la esfera (28) y los orificios **P** y **N**. Como el circuito drenaje del orificio **N** está abierto, el aceite en el orificio **M** también queda drenado. La válvula selectora de traba (24) se ve empujada hacia la derecha por el resorte (22) y cierra los orificios **Q**, **L**, **S** y **T** y abre los orificios **Q**, **S**, **L** y **R**.

Entonces, el aceite procedente de la bomba pasa a través del orificio **Q** hacia el orificio **S** para funcionar como la contrapresión del pistón del embrague del estator. Activa "ON" el embrague del estator después que aumenta la presión del aceite del circuito. Al mismo tiempo, el aceite que ha estado funcionando como la contrapresión del pistón del embrague de traba, es drenado a través del orificio **L** hacia el orificio **R**, poniendo en "OFF = DESACTIVANDO" el embrague de traba. El aceite proveniente de la bomba de intercambio también entra al orificio **P**. Como la válvula solenoide está des energizada

[cortada su imantación], es drenada a través del orificio **A**. El orificio **A** mantiene la presión de aceite en el orificio **Q** y es regulada por la válvula moduladora (10).

Modulación del embrague del impelente

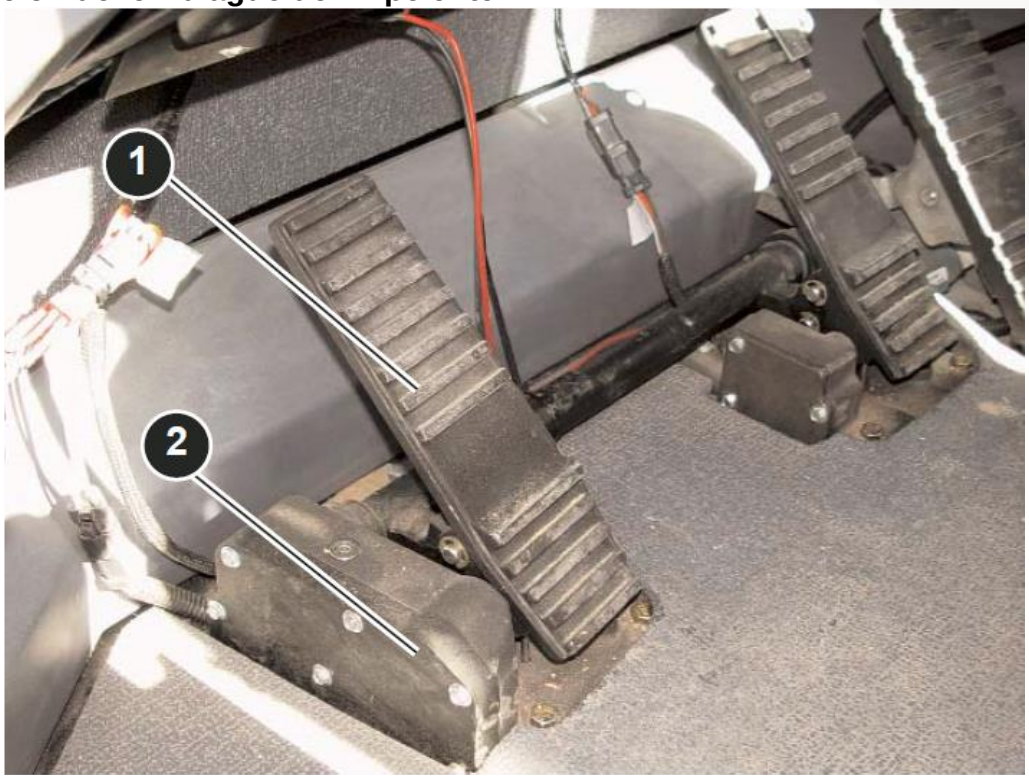


Figura 45

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

El ECM del tren de fuerza supervisa la posición del pedal del convertidor (1) con el sensor de posición del pedal del convertidor (2) situado en el pivote para el pedal. Como el operador presiona el pedal, El ECM del tren de fuerza incrementa la corriente al solenoide del embrague del impelente con lo que se reduce la presión hidráulica al embrague del impelente. El rimpull disminuirá con el recorrido del pedal desde el máximo regulada hasta el mínimo con el pedal pisado al máximo. Cuando el operador suelta el pedal izquierdo, el rimpull volverá al porcentaje máximo fijado por el Switch selector del rimpull (no demostrado). Cuando el porcentaje máximo permitido está en los valores más inferiores, el cambio total del rimpull de máximo al mínimo se disminuye. Esta condición da lugar a un cambio más gradual de rimpull sobre el recorrido del pedal del convertidor de torque. Si la máquina no está en PRIMER VELOCIDAD, la presión del embrague del impelente seguirá al máximo nivel hasta que la transmisión se cambie a la primera velocidad. El pedal del convertidor de torque funciona semejantemente cuando el switch del selector del rimpull está en la posición máxima, a menos que el porcentaje máximo permitido ahora sea el 100%.

NOTA:
Un aumento en corriente al solenoide del embrague del impelente desde ECM del tren de fuerza resulta en una disminución de la presión al embrague del impelente.

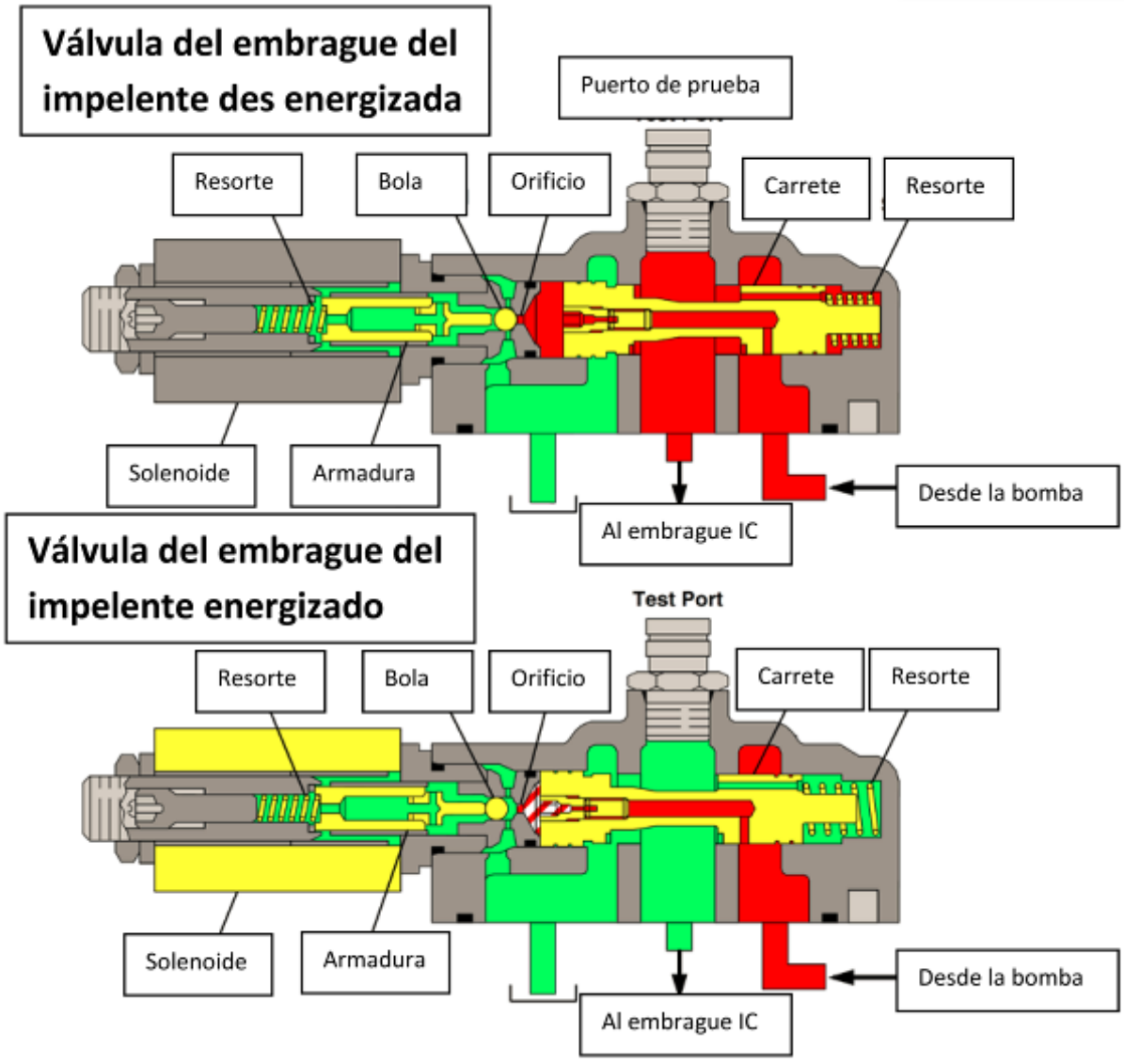


Figura 46

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

La ilustración anterior es una vista seccional de la válvula de solenoide del embrague del impelente. Cuando SE DESENERGIZA el solenoide del embrague del impelente, el resorte mueve el pin contra la bola. La bola bloquea el orificio para drenar. La presión del aceite aumenta en el extremo izquierdo de la válvula y mueve el carrete a la derecha contra resorte. El carrete bloquea el paso a drenaje y abre paso entre el embrague del impelente y la bomba con lo cual el aceite va al embrague del impelente. Cuando SE ENERGIZA el solenoide del embrague del impelente, el solenoide mueve el núcleo contra el resorte y la bola descubre el orificio. El aceite a través del orificio va a

drenar. El resorte del carrete de la válvula mueve el carrete de la válvula a la izquierda. El carrete bloquea el paso entre el embrague del impelente y la bomba y abre el paso entre el embrague del impelente y el drenaje. El flujo de la bomba al embrague del impelente es bloqueado. El aceite en el embrague del impelente fluye al drenaje.

1.4 Funcionamiento y operación de las transmisiones planetaria.

Se denomina transmisión mecánica a un mecanismo encargado de transmitir potencia entre dos o más elementos dentro de una máquina. Son parte fundamental de los elementos u órganos de una máquina, muchas veces clasificados como uno de los dos subgrupos fundamentales de estos elementos de transmisión y elementos de sujeción.

En la gran mayoría de los casos, estas transmisiones se realizan a través de elementos rotantes, ya que la transmisión de energía por rotación ocupa mucho menos espacio que aquella por traslación.

Una transmisión mecánica es una forma de intercambiar energía mecánica distinta a las transmisiones neumáticas o hidráulicas, ya que para ejercer su función emplea el movimiento de cuerpos sólidos, como lo son los engranajes y las correas de transmisión.

Típicamente, la transmisión cambia la velocidad de rotación de un eje de entrada, lo que resulta en una velocidad de salida diferente. En la vida diaria se asocian habitualmente las transmisiones con los automóviles. Sin embargo, las transmisiones se emplean en una gran variedad de aplicaciones, algunas de ellas estacionarias. Las transmisiones primitivas comprenden, por ejemplo, reductores y engranajes en ángulo recto en molinos de viento o agua y máquinas de vapor, especialmente para tareas de bombeo, molienda o elevación (norias).

En general, las transmisiones reducen una rotación inadecuada, de alta velocidad y bajo par motor, del eje de salida del impulsor primario a una velocidad más baja con par de giro más alto, o a la inversa. Muchos sistemas, como las transmisiones empleadas en los automóviles, incluyen la capacidad de seleccionar alguna de varias relaciones diferentes. En estos casos, la mayoría de las relaciones (llamadas usualmente «marchas» o «cambios») se emplean para reducir la velocidad de salida del motor e incrementar el par de giro; sin embargo, las relaciones más altas pueden ser sobre marchas que aumentan la velocidad de salida.

También se emplean transmisiones en equipamiento naval, agrícola, industrial, de construcciones y de minería. Adicionalmente a las transmisiones convencionales basadas en engranajes, estos dispositivos suelen emplear transmisiones hidrostáticas y accionadores eléctricos de velocidad ajustable.

1.5 Tipos de transmisiones usadas en equipos mina

- Transmisiones planetarias
- Transmisiones de contra eje

Transmisiones Planetarias.

La transmisión planetaria usa un sistema de engranajes planetarios para transmitir la energía y para realizar los cambios de velocidad y dirección. Los embragues hidráulicos controlan la rotación de los componentes del engranaje planetario permitiendo que el engranaje planetario sirva como acople directo, engranaje de reducción, o de inversión de marcha.

Los sistemas de engranajes planetarios son unidades compactas. Se ha eliminado el contra eje, el eje de entrada y el eje de salida rotan alineados. Un sistema de engranajes planetario permite que las relaciones de transmisión sean cambiadas sin necesidad de acoplar o desacoplar los engranajes. Consecuentemente, hay poco o nada de interrupción del flujo de potencia. En sistemas de engranajes planetarios, la carga se distribuye por varios engranajes, disminuyendo la carga puntual en cada diente. El sistema planetario también divide la carga uniformemente alrededor de la circunferencia del sistema, eliminando el esfuerzo axial en los ejes.

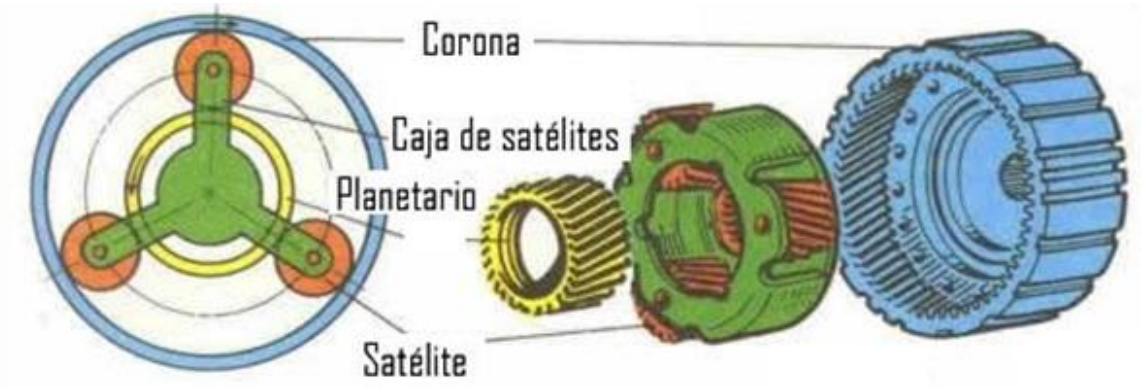


Figura 47

Componentes

Un sistema planetario en su forma más simple está compuesto de:

1. En engranaje solar (el centro del sistema planetario)
2. Tres o más engranajes intermedios (engranajes planetarios)
3. Un portador planetario (soporta los engranajes planetarios)
4. Un engranaje de anillo o corona (el límite externo del sistema planetario)

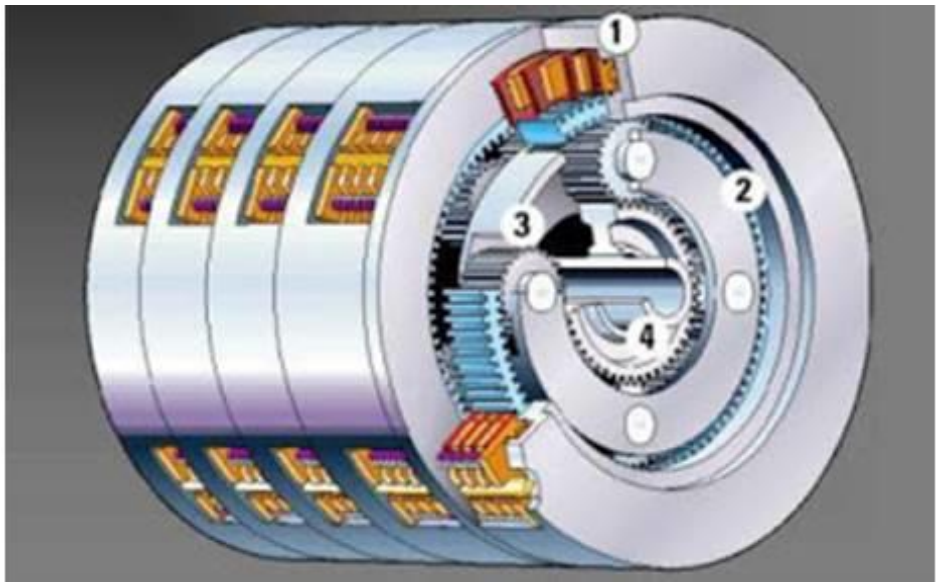


Figura 48

1) Alojamiento de Embragues, 2) Corona, 3) Porta-Planetario, 4) Solar (Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

La transmisión planetaria controla la potencia a través de los sistemas planetarios con los paquetes de embrague de discos y platos. Cada paquete de embrague está contenido en una cubierta separada.

En algunas transmisiones planetarias, los paquetes de embrague se montan en el perímetro del sistema planetario. Los dientes interiores de los discos se acoplan (engranan) con los dientes exteriores de la corona. Las muescas en el diámetro exterior de los platos se acoplan con pines a la cubierta del embrague, fijándolos. Los siguientes ejemplos asumirán ese tipo de transmisión.

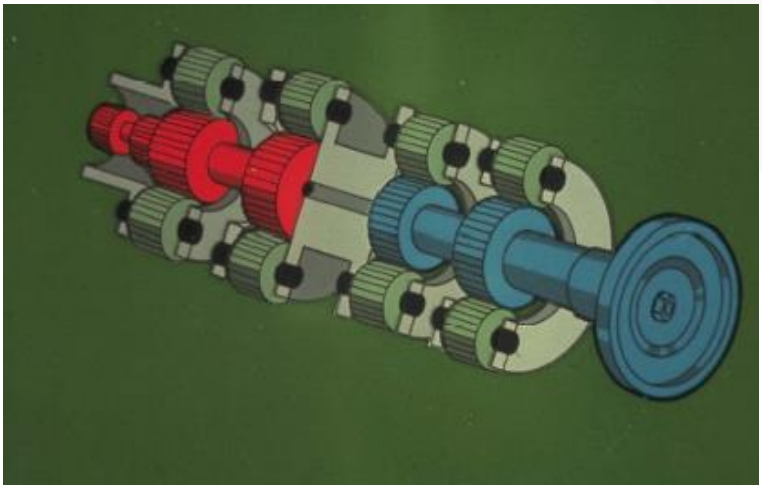


Figura 49

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

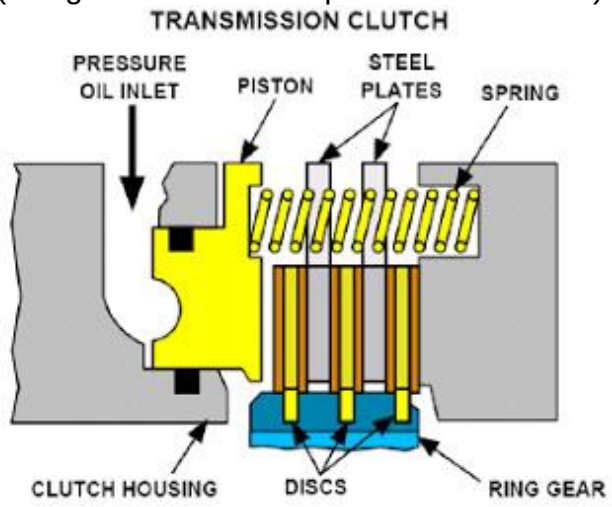


Figura 50

Figura 51

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

La figura ilustra los componentes de un embrague. Los resortes están situados entre la cubierta del embrague y el pistón. Estos mantienen los embragues desacoplados, al no permitir que el pistón de embrague ejerza presión contra los platos. Los embragues se acoplan cuando el aceite es enviado en el área posterior del pistón. Cuando la presión del aceite aumenta, el pistón se mueve a la derecha contra la fuerza del resorte y empuja los discos y platos, juntándolos. El embrague ahora se acopla y el engranaje de la corona se mantiene fijo. Cuando la presión del aceite que sostiene al pistón disminuye, el resorte fuerza al pistón nuevamente dentro de la cámara liberando los discos y los platos. La corona ya no está fija y gira libremente.

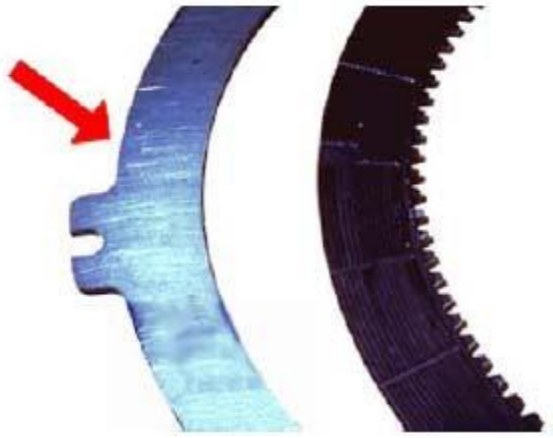


Figura 52

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Platos de Presión

Los platos de presión del embrague (fig. superior) se montan dentro de la carcasa del embrague. Las muescas en el diámetro exterior de los platos se fijan con pines a la carcasa del embrague impidiendo su rotación.

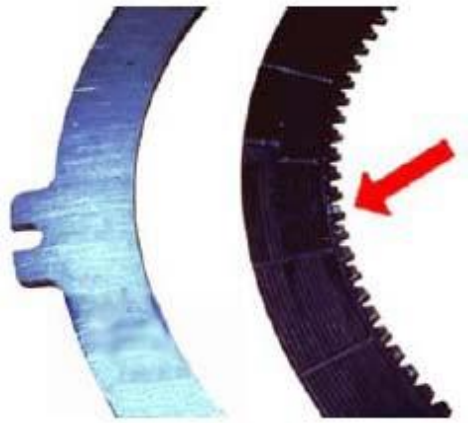


Figura 53

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Discos de Embrague

Los discos de embrague (fig. superior) están unidos a la corona y giran con ella. Los dientes interiores de los discos engranan con los dientes exteriores de la corona. Los discos están hechos de diferentes materiales de fricción basados en los requisitos de operación.

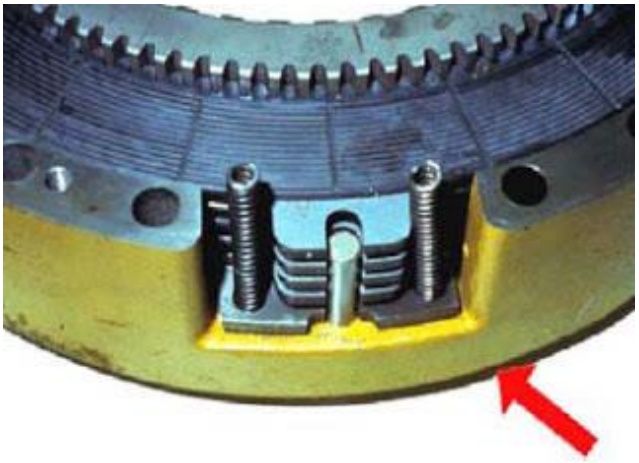


Figura 54

Por gentileza de Caterpillar Américas Co.

Caja (Carcasa)

Cada embrague en la transmisión tiene su propia cubierta (carcasa) (fig. superior). La carcasa mantiene el pistón y los platos de presión fijos con ella. Los pines se utilizan para evitar que los platos giren libremente.

Funcionamiento del Tren Planetario

Los engranajes planetarios se utilizan de muchas maneras en las máquinas Caterpillar. Comprender los principios de los engranajes planetarios ayudará a comprender los fundamentos de la servo transmisión planetaria, de la cual los juegos de engranajes planetarios forman una gran parte.

Los engranajes planetarios (1) están sujetos a una base o portador (2) llamado Conjunto de Engranajes Planetarios porta satélites. El engranaje externo (3) se llama corona. El piñón diferencial en el centro (4) se llama engranaje solar.

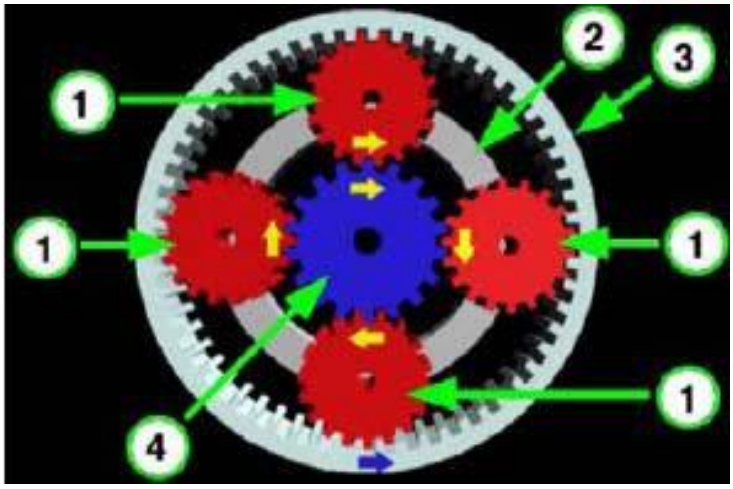


Figura 55

Reducción planetaria

Figura 56

Carrier o portador (Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Los componentes del juego de engranajes planetarios toman sus nombres porque actúan igual que nuestro sistema solar. Los engranajes planetarios rotan alrededor del engranaje solar igual que los planetas en nuestro sistema solar giran alrededor del sol.

Se requerirá menos espacio en una transmisión si se usan juegos de engranajes planetarios en lugar de engranajes de dientes externos, porque todos los engranajes pueden estar dentro de la corona.

Los engranajes de dientes externos rotan en direcciones opuestas, sin embargo, la dirección de rotación no cambia con una corona. El piñón diferencial y la corona giran en la misma dirección.

Otra ventaja de los juegos de engranajes planetarios (engranajes de dientes internos) es que tienen el doble de contacto de dientes que los engranajes de dientes externos. Los engranajes planetarios son más fuertes y se desgastan menos que los engranajes de dientes externos Para cambiar de rotación se pone un engranaje planetario entre el piñón y la corona.

Los engranajes planetarios giran libremente sobre sus propios cojinetes, y el número de dientes no afecta la relación de los otros dos engranajes. Con juegos de engranajes planetarios hay tres o cuatro engranajes planetarios que giran sobre cojinetes.

Transmisión de Contra eje

Figura 57

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Un tipo de transmisión utilizada en las máquinas Caterpillar es la servo transmisión de contraeje. A continuación se describe los componentes fundamentales de la servo transmisión de contra eje, su funcionamiento (incluyendo el flujo de potencia) y los procedimientos de prueba de desempeño y localización de averías.

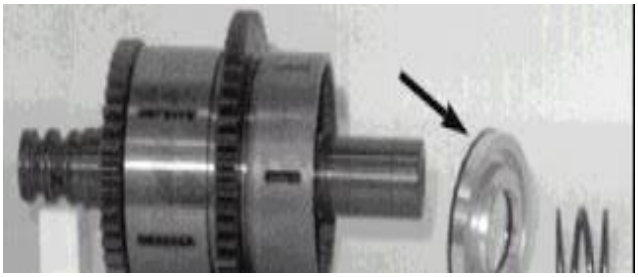
Las servo-transmisiones de contra eje se diferencian de las planetarias en que utilizan engranajes rectos de engranaje constante. La transmisión no tiene collares deslizantes. Los cambios de velocidad y dirección se obtienen enganchando hidráulicamente varios conjuntos de embrague.

Componentes

Figura 58

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Los embragues se enganchan hidráulicamente y se desenganchan por la fuerza de resortes. Los embragues se enganchan de manera que proporcionen la apropiada reducción de velocidad y dirección al eje de salida de la transmisión.



(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Pistón de Embrague

El pistón del embrague tiene un sello interior y exterior. Cuando los discos han gastado la mitad de la profundidad del canal de aceite, el pistón del embrague llega lo suficientemente lejos como para mover de su lugar (reventar) el sello exterior. Esto evita que los discos y platos jamás funcionen metal contra metal.

La presión del embrague direccional o de velocidad llena la cavidad detrás del pistón de embrague y mueve el pistón hacia la izquierda contra el resorte del pistón y engancha los discos y platos del embrague

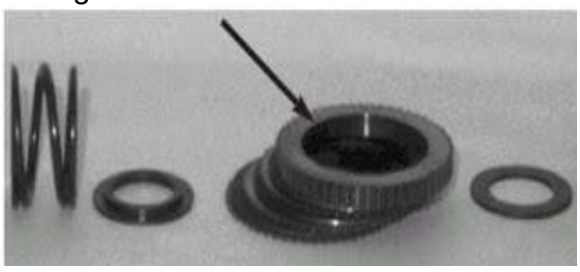


Figura 59

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Disco y Platos de Embrague

Los platos del embrague están montados dentro de la caja del embrague. Las estrías en el diámetro interior de los platos están engranadas con las estrías en la caja del embrague. Los platos y la caja giran juntos. Los discos del embrague están superpuestos entre los platos del embrague. Los dientes interiores de los discos se engranan con los dientes exteriores de la maza. Los discos del embrague tienen un material de fricción adherido a su superficie de manera que no haya un contacto de metal a metal entre los discos y platos de embrague.

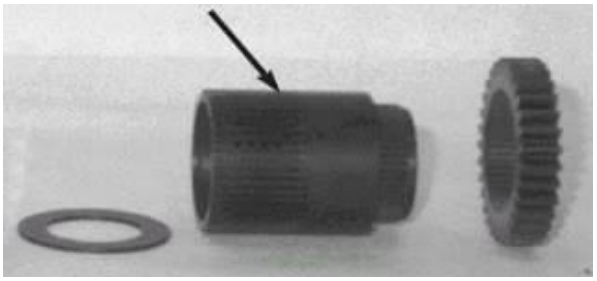


Figura 60

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Maza o Cubo

Es el componente en el conjunto de embrague al que el engranaje está empalmado en estrías. Cuando el pistón del embrague se engancha, la fuerza de los platos y discos de embrague se transfiere al engranaje a través de la maza.

Figura 61

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Ejes

Los ejes sostienen los engranajes dentro de la transmisión. El número de ejes y engranajes está determinado por el modelo de la transmisión y de la máquina.

Figura 62

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Pasajes de Aceite

Cada uno de los ejes de la transmisión tiene tres pasajes de aceite internos. Un pasaje es para que pase el aceite para la lubricación y el enfriamiento de los embragues, los cojinetes y los engranajes. Los otros dos pasajes son para que pase el aceite bajo presión para el enganche de los embragues en cada eje.

Funcionamiento y operación de las transmisiones

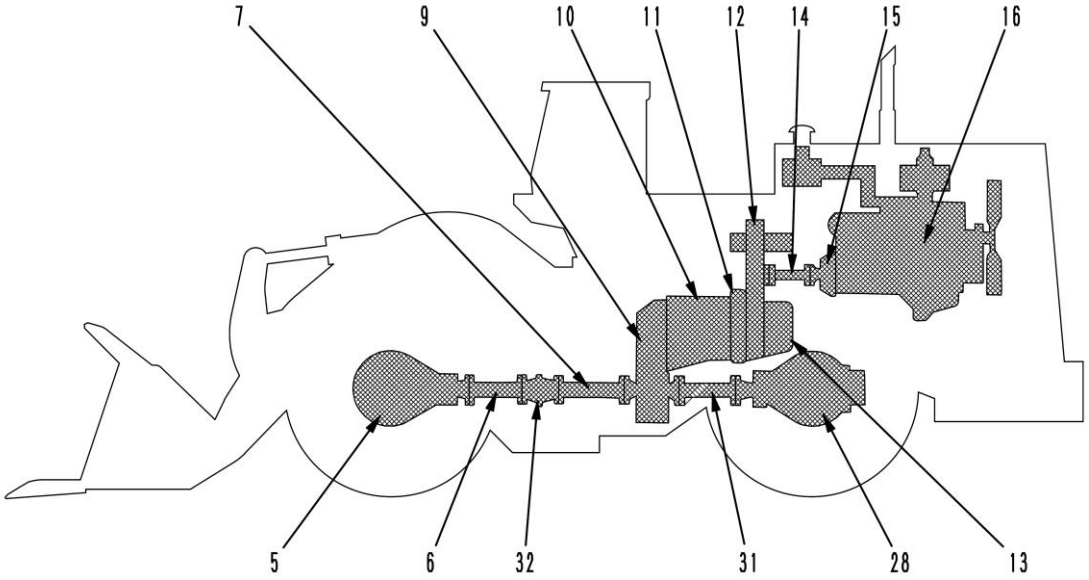


Figura 63

Estructura del cargador WA-1200 (Por gentileza de Komatsu Cummins)

1. Diferencial delantero 2. Freno delantero 3. Mando final delantero 4. Neumático delantero 5. Eje delantero 6. Eje propulsor delantero 7. Eje propulsor central 8. Bomba para dirección por emergencia 9. Caja de transferencia 10. Transmisión 11. Convertidor de torsión	12. Caja de PTO 13. Embrague modulado 14. Eje propulsor superior 15. Amortiguador 16. Motor 17. Bomba No. 1 del equipo de trabajo 18. Bomba No. 2 del equipo de trabajo 19. Bomba conmutable 20. Bomba de la dirección 21. Bomba de control 22. Bomba PPC

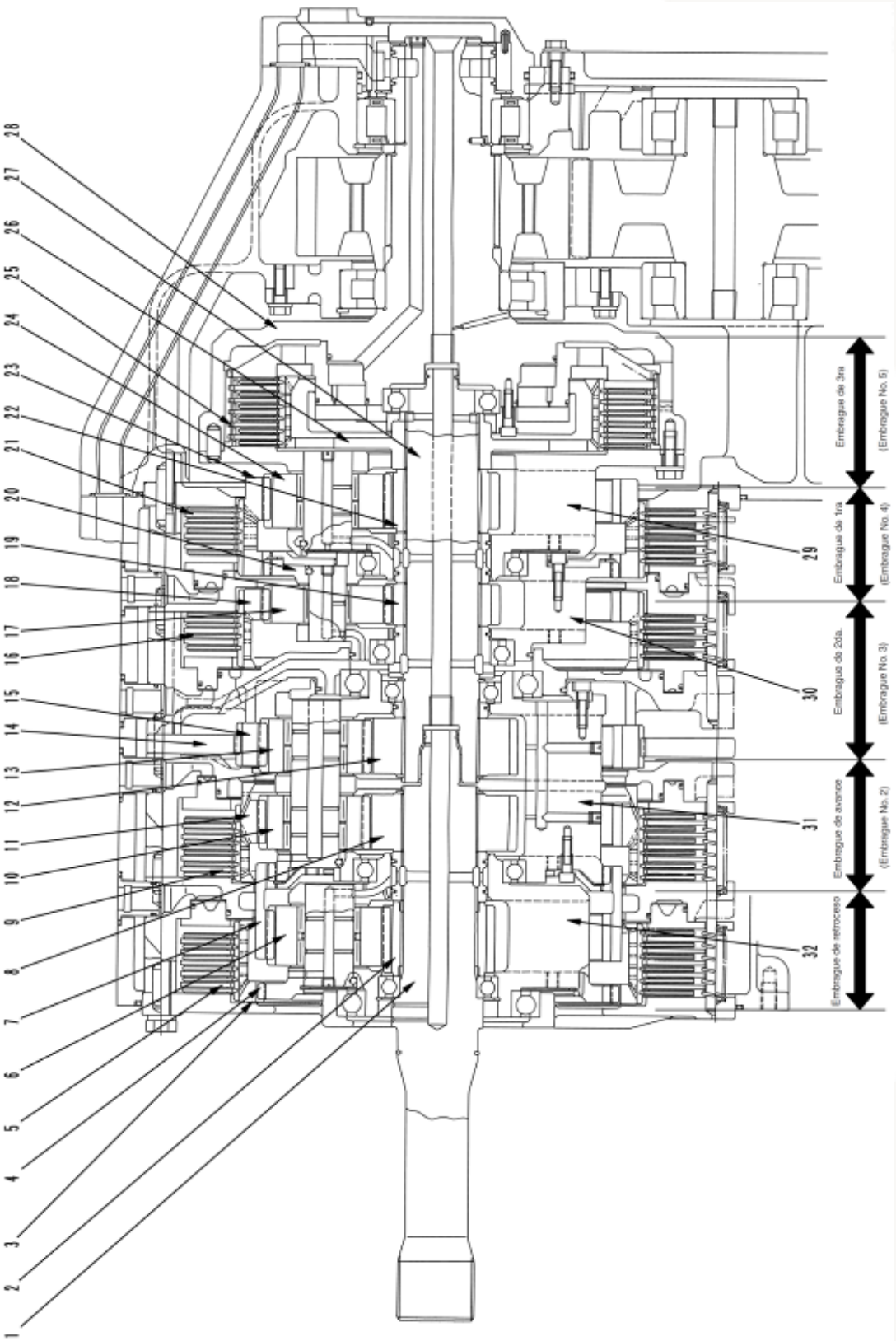
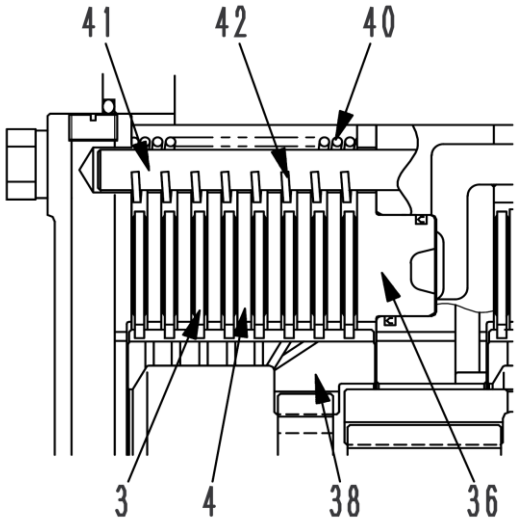


Figura 64

Detalle de transmisión en corte WD-900 (Por gentileza de Komatsu Cummins)

1. Eje de entrada 2. Engranaje solar de retroceso (26 dientes) 3. Corona de retroceso (90 dientes) 4. Engranaje (90 dientes) 5. Embrague de retroceso 6. Engranaje planetario (30 dientes) 7. Corona (86 dientes) 8. Engranaje solar de avance (38 dientes) 9. Embrague de avance 10. Engranaje planetario (26 dientes) 11. Corona de avance (90 dientes) 12. Engranaje solar (38 dientes) 13. Engranaje planetario (26 dientes) 14. Corona (140 dientes) 15. Corona (90 dientes) 16. Embrague de 2da 17. Engranaje planetario (31 dientes)	18. Corona de 2a. marcha (140 dientes) 19. Engranaje solar de 2a. marcha (27 dientes) 20. Engranaje (89 dientes) 21. Embrague de 1ra. 22. Engranaje solar de 1a. marcha (27 dientes) 23. Corona de 1a. marcha (89 dientes) 24. Engranaje planetario (31 dientes) 25. Embrague de 3ra. 26. Engranaje de cubo (112 dientes) 27. Eje libre 28. Eje de salida 29. Portadora de la 1a. marcha 30. Portadora de la 2a. marcha 31. Portadora de avance 32. Portadora de retroceso

Operación



(Por gentileza de Komatsu Cummins)

Operación del embrague

El embrague consiste de pistón (36), plato (4), disco (3), pasador (41), resorte de retorno del pistón (40), arandela de resorte (42), etc., para asegurar la corona o engranaje anular (38). El diente interior del disco (3) está engranado con el diente exterior de la corona o engranaje anular (38). La parte cortada del exterior del plato (4) está engranada con el pasador (41) el cual está fijo al bastidor del embrague (6).

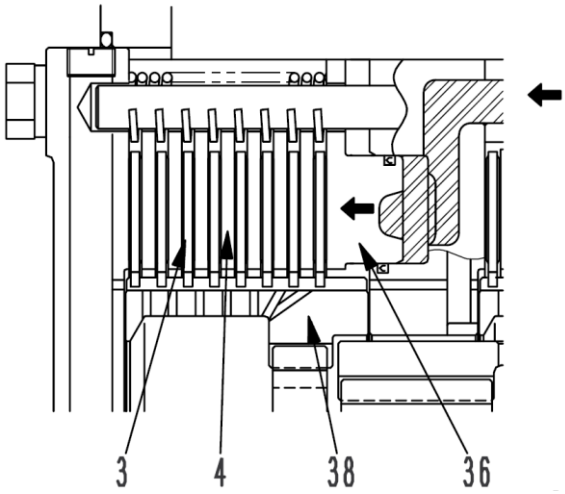


Figura 65

(Por gentileza de Komatsu Cummins)

Embrague activado "ON" (Fijo)

El aceite enviado por la válvula de la transmisión fluye a través del pasaje de aceite en la transmisión hacia la cara trasera del pistón (36) para mover el pistón (36) hacia la izquierda. El pistón (36) comprime el plato (4) contra el disco (3) para detener, con la fuerza de fricción, la rotación del disco (3) y fija la corona o engranaje anular (38) engranado con el diente interior.

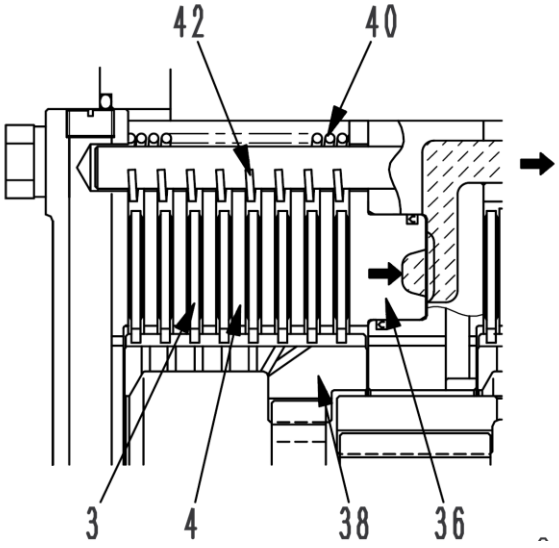


Figura 66

(Por gentileza de Komatsu Cummins)

Embrague desactivado "OFF" (Liberado)

El flujo del aceite proveniente de la válvula de la transmisión es cerrado, entonces el pistón (36) es devuelto por la presión del resorte de retorno (40), luego, la fuerza de fricción entre el plato (4) y el disco (3) es liberada y la corona o engranaje anular (38) queda colocado en posición neutral. La arandela resorte (42) instalada entre los platos (4) en la sección del pasador devuelve rápidamente el pistón (36) y separa repentinamente el plato (4) del disco (3) para prevenir el arrastre de rotación cuando el embrague es desengranado (liberado).

Tabla de marchas

Velocidad	Embrague (engranado) operado
1a. velocidad de avance	No.2 · No.5
2da velocidad de avance	No.2 · No.4
3ra velocidad de avance	No.2 · No.3
1ra velocidad de retroceso	No.1 · No.5
2da velocidad de retroceso	No.1 · No.4
3ra velocidad de retroceso	No.1 · No.3

Tabla 1

(Por gentileza de Komatsu Cummins)

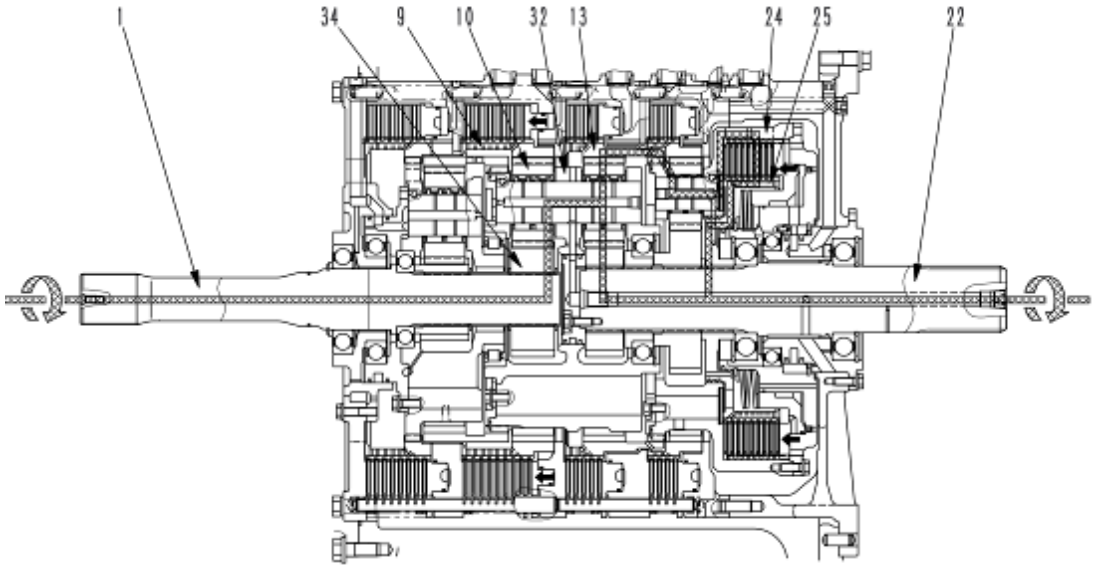


Figura 67

Transmisión en 1° velocidad hacia delante (Por gentileza de Komatsu Cummins)

Cuando la transmisión es colocada en 1a. velocidad de avance, los embragues No. 2 y No. 5 están engranados, la corona o engranaje anular No. 2 (9) está fijo y el núcleo (25) del embrague No. 5 está acoplado directamente con el eje de salida (22) para transferir la potencia de salida. La potencia proveniente del convertidor de torsión es transmitida al eje de entrada (1), luego es transmitida a través del engranaje solar No. 2 (34) al engranaje planetario No. 2 (10). Debido a que la corona o engranaje anular No. 2 (9) está fijo, el engranaje planetario No. 2 (10) gira y simultáneamente da vueltas a lo largo de la corona o engranaje anular No. 2 (9) alrededor del engranaje solar No. 2 (34).

En este momento, la rotación de los porta planetarios No. 2 y No. 3 (32) es transmitida como potencia rotacional en la dirección de rotación del engranaje solar No. 2 (34). Como el embrague No. 5 está engranado, la corona o engranaje anular No. 3 (13), el porta planetarios No. 4, el tambor (24) del embrague No. 5 y el núcleo (25) del embrague No. 5 están fijos como una sola unidad. Debido a que los porta planetarios No. 2 y No. 3 (32) giran bajo esta condición, la unidad entera de la corona o engranaje anular No. 3 (13), porta planetarios No. 4, tambor (24) del embrague No. 5, y núcleo (25) del embrague No. 5 giran, y la potencia de rotación es enviada hacia afuera a través del eje de salida (22) en la dirección de rotación del engranaje solar No. 2 (34).

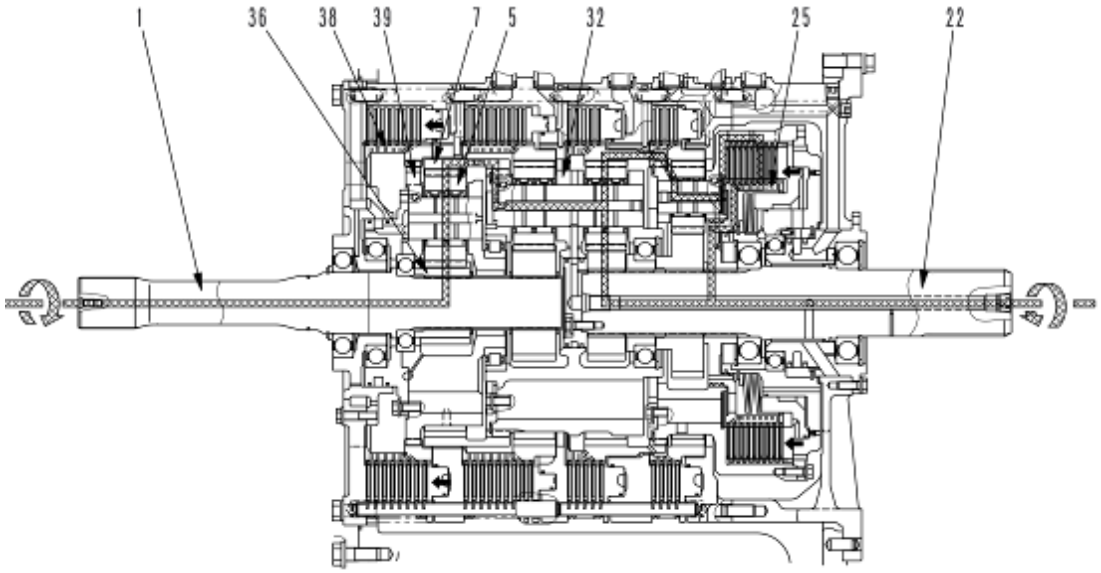


Figura 68

Transmisión en 1° velocidad en retroceso (Por gentileza de Komatsu Cummins)

Cuando la transmisión es colocada en la 1a. velocidad de retroceso, los embragues No. 1 y No. 5 están engranados, la corona o engranaje anular No. 1 (38) está fijo y el núcleo (25) del embrague No. 5 está acoplado directamente con el eje de salida (22) para transferir la potencia de salida. La potencia proveniente del convertidor de torsión es transmitida al eje de entrada (1), luego es transmitida a través del engranaje solar No. 1 (36) y del engranaje planetario No. 1 (5) hacia la corona o engranaje anular No. 1 (7). Debido a que la corona o engranaje anular No. 1 (38) está fijo, el engranaje planetario No. 1 (5) gira y simultáneamente da vueltas alrededor del engranaje solar

No. 2 (36).En este momento, a causa de que el embrague No. 1 fija al porta planetarios No. 1 (39), la potencia rotacional del engranaje planetario No. 1 (5) es transmitida a los porta planetarios No. 2 y No. 3 (32) para hacer girar la corona o engranaje anular No. 1 (7) en dirección opuesta a la del engranaje solar No. 1 (36). Como resultado, la potencia en dirección de retroceso es transmitida al eje de salida (22). Después de este punto, el tren de fuerza en 1a., 2a, o 3a. velocidad de retroceso, es similar a la de la 1a., 2a., o 3a. velocidad de avance descritas antes.

1.6 Válvulas de control y modulación de la transmisión.

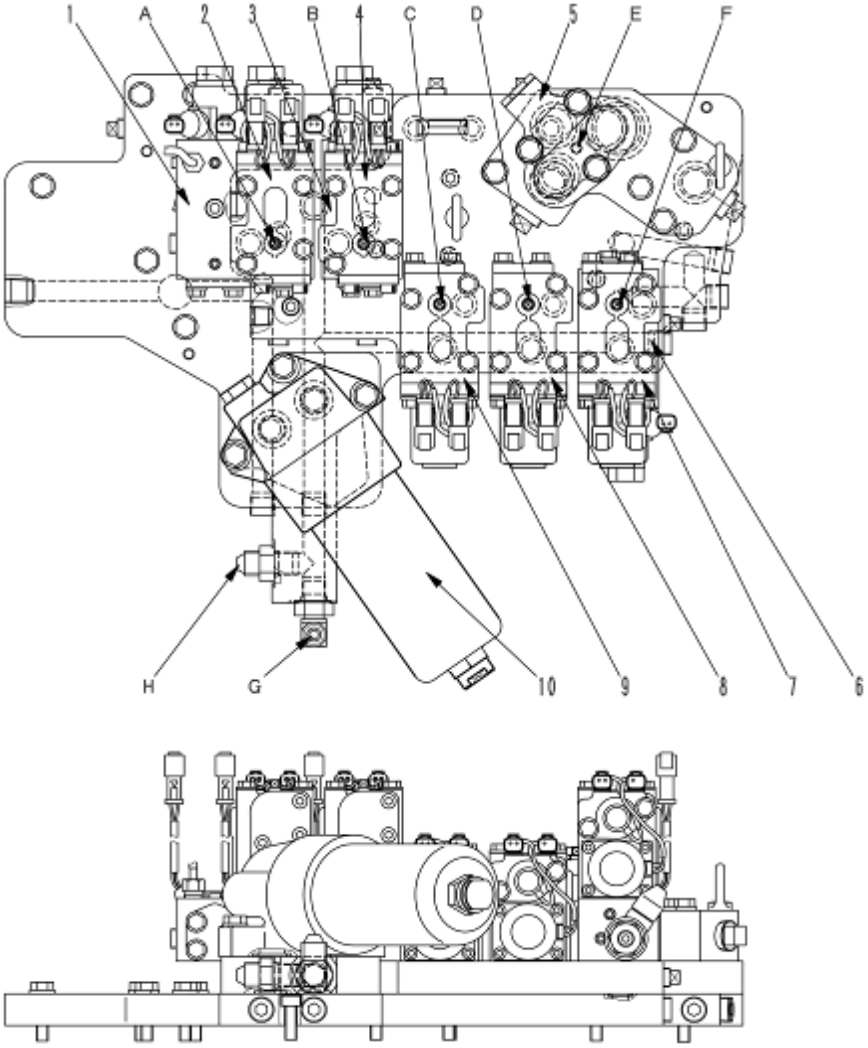


Figura 69

Válvula de control y modulación cargador WA 1200 (Por gentileza de Komatsu Cummins)

A: Orificio de toma de la presión de aceite del embrague dé marcha atrás **B:** Orificio de toma de la presión de aceite del embrague de avance **C:** Orificio para toma de presión de aceite del embrague de 3a. **D:** Orificio para toma de presión de aceite del embrague de 2a. **E:** Orificio de toma de la presión de aceite de lubricación **F:** Orificio para toma de presión de aceite del embrague de 1a. **G:** Hacia la válvula del freno de estacionamiento **H:** Hacia el embrague modulado ECMV	1. Válvula de llenado por derivación y válvula de drenaje por derivación (para el embrague de retroceso) 2. ECMV (para el embrague de retroceso) 3. Válvula de llenado por derivación (para el embrague de avance) 4. ECMV (para el embrague de avance) 5. Válvula de alivio del aceite de lubricación 6. Válvula de llenado por derivación (para el embrague de 1a. velocidad) 7. ECMV (para el embrague de 1a. velocidad) 8. ECMV (para el embrague de 2a. velocidad) 9. ECMV (para el embrague de 3a. velocidad) 10. Filtro piloto

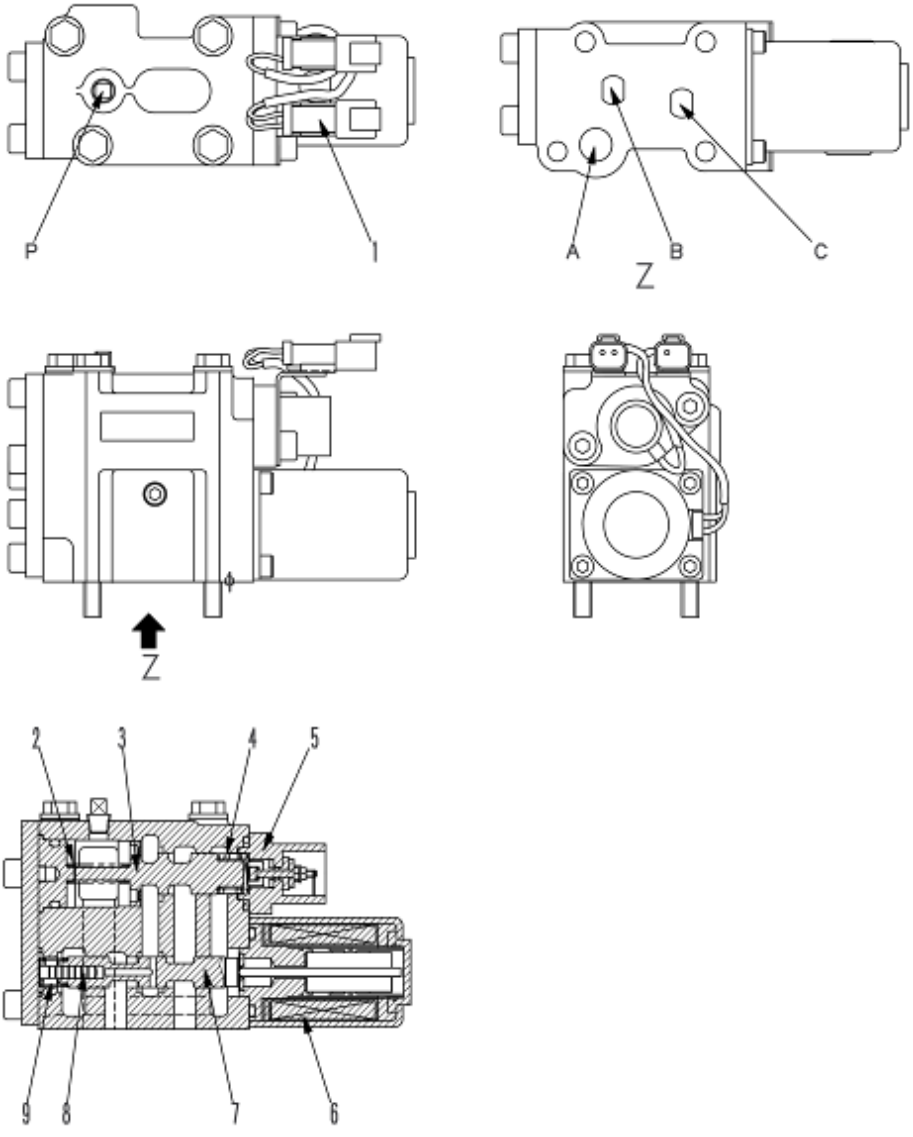


Figura 70

Válvula Moduladora de Control Electrónico (ECMV) (Por gentileza de Komatsu Cummins)

A: Hacia el embrague B: Drenaje C: Procedente de la bomba P: Orificio de toma de la presión de aceite del embrague	1. Conector 2. Resorte 3. Carrete de la válvula sensora de flujo 4. Resorte 5. Switch de llenado 6. Solenoide proporcional 7. Carrete de la válvula de control de presión 8. Pistón de carga 9. Resorte

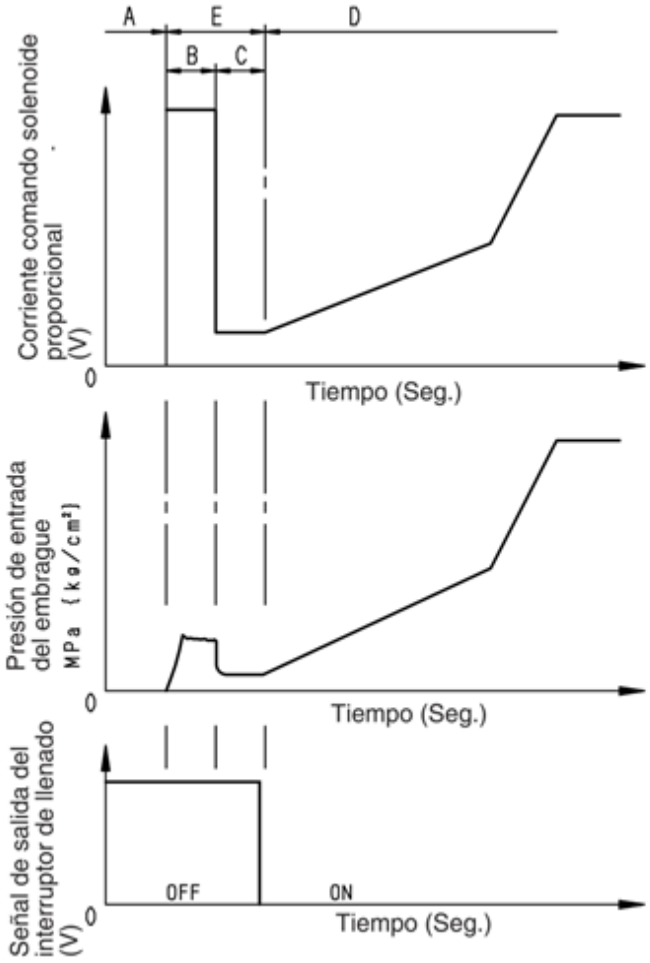


Figura 71

Curvas y señales características del control ECMV solenoide proporcional (Por gentileza de Komatsu Cummins)

Descripción del ECMV

- La ECMV (Válvula Moduladora de Control Electrónico) consiste de una válvula de control de presión y un sensor de flujo.
- Válvula de control de presión

Esta válvula recibe la corriente enviada por la transmisión por medio de un solenoide proporcional, luego la convierte en presión de aceite.

- Válvula sensor de flujo

Esta válvula opera de acuerdo a la señal enviada por la válvula de control de presión y tiene las siguientes funciones.

1) Cuando el embrague está lleno de aceite, se cierra y emite una señal (señal de llenado) hacia el controlador para informarle que está completamente lleno con aceite.
2) Mantiene la emisión de señales (señales de llenado) hacia el controlador, para notificar si la presión del aceite está o no aplicada, mientras la presión del aceite es aplicada al embrague.
   - Rango A: Antes de cambiar de engranaje (cuando está drenando)
   - Rango B: Inicia el llenado (durante el disparo)
   - Rango C: Abastecimiento finalizado
   - Rango D: Ajuste de presión
   - Rango E: Durante el llenado

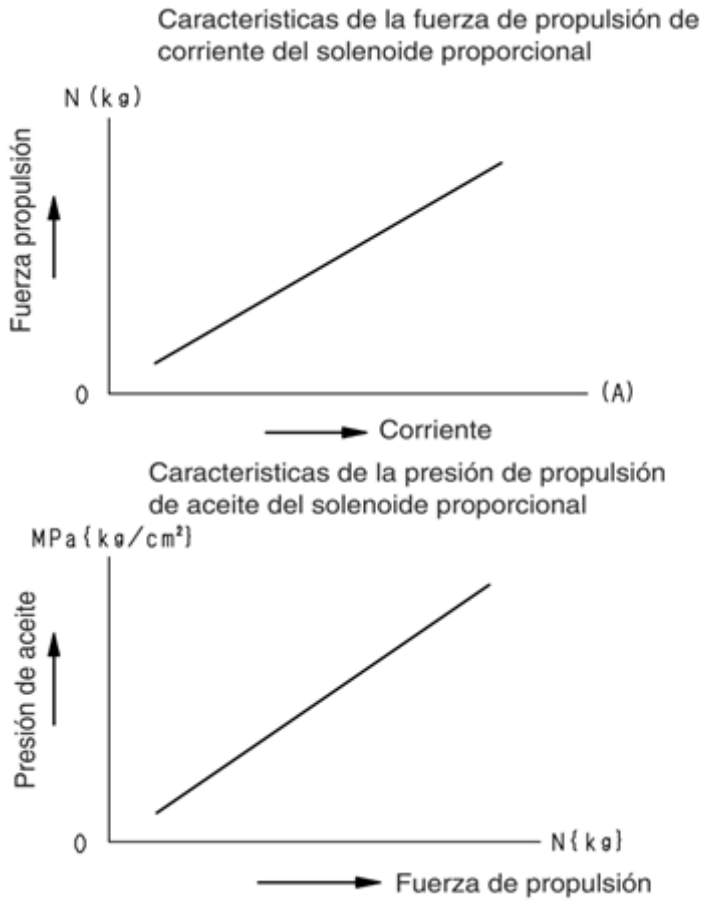


Figura 72

Curvas y señales características del control ECMV solenoide proporcional (Por gentileza de Komatsu Cummins)

ECMV y solenoide proporcional

- Por cada ECMV, hay un solenoide proporcional instalado. El solenoide proporcional genera una fuerza de propulsión de acuerdo a la corriente de comando proveniente de la transmisión, tal como lo muestra la figura de la derecha.
- La fuerza de propulsión generada por el solenoide proporcional es aplicada al carrete de la válvula de control de presión para generar la presión de aceite mostrada en la figura de la derecha. De acuerdo a esto, la fuerza de propulsión cambia al controlar la corriente de comando que opera la válvula de control de presión y controla el flujo y presión del aceite.

ECMV e interruptor de suministro

- Por cada ECMV, hay un interruptor de llenado instalado. Si el embrague está lleno, la válvula sensor de flujo activa (ON) el interruptor de llenado. Cuando esta señal es emitida, la presión de aceite inicia su crecimiento.

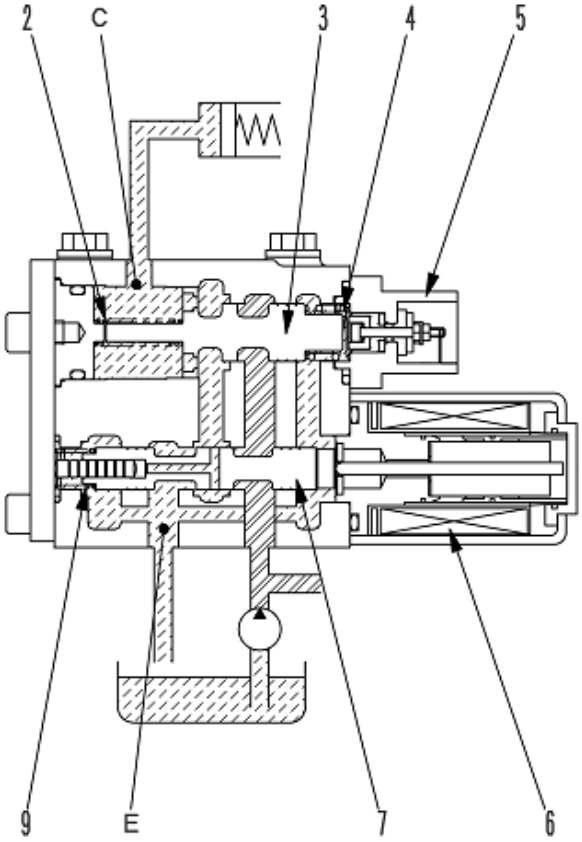


Figura 73

Antes de cambiar de engranaje (cuando está drenando)

(Rango A en la tabla)

Mientras no haya ninguna corriente fluyendo en el solenoide proporcional (6), el solenoide proporcional (6) es empujado hacia atrás por la reacción de la fuerza del resorte (9) de la válvula de control de presión a través del carrete (7) de la válvula de control de presión. De acuerdo a esto, el carrete (7) de la válvula de control de presión drena el aceite proveniente del orificio C del embrague a través del orificio de drenaje E. En este momento, debido a que no hay ninguna presión de aceite aplicada al carrete (3) de la válvula sensor de flujo, el carrete (3) de la válvula sensor de flujo está separado del interruptor de llenado (5) por la reacción de la fuerza del resorte (4) del interruptor de llenado, y se encuentra detenido en una posición donde el resorte (4) del interruptor de llenado está balanceado con el resorte de retorno (2) de la válvula sensor de flujo.

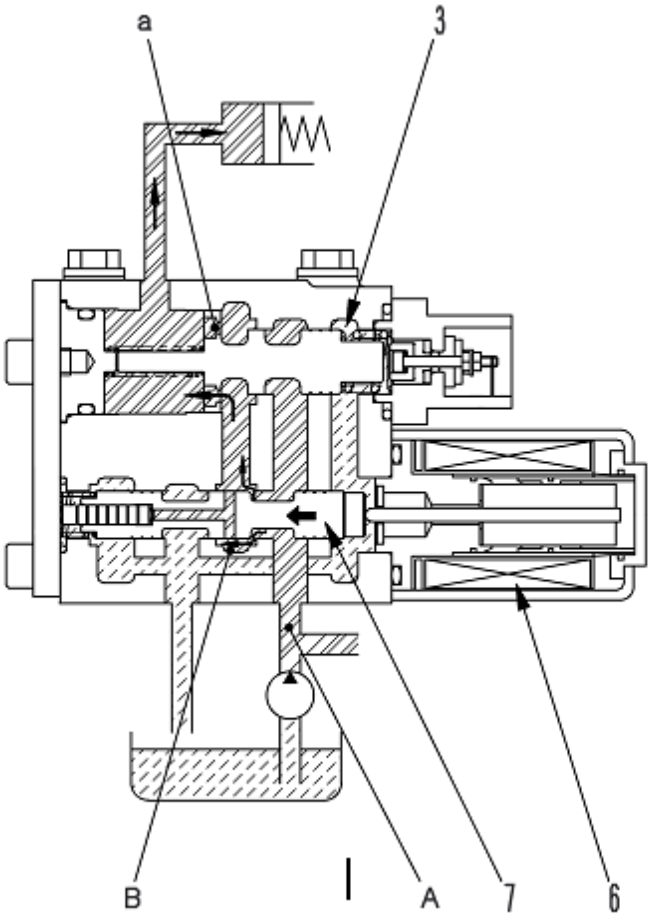


Figura 74

Cuando se inicia el llenado (durante el disparo) (Por gentileza de Komatsu Cummins)

(Rango B en la tabla)

Si la corriente es entregada al solenoide proporcional (6) mientras el embrague está sin aceite, el solenoide proporcional (6) hace su recorrido y el carrete (7) de la válvula de control de presión se mueve hacia la izquierda. Como resultado, se abre el orificio A de la bomba y el orificio B de salida de la válvula de control de presión, entonces el aceite empieza a fluir dentro del, embrague a través del orificio a del carrete (3) de la válvula sensor de flujo.

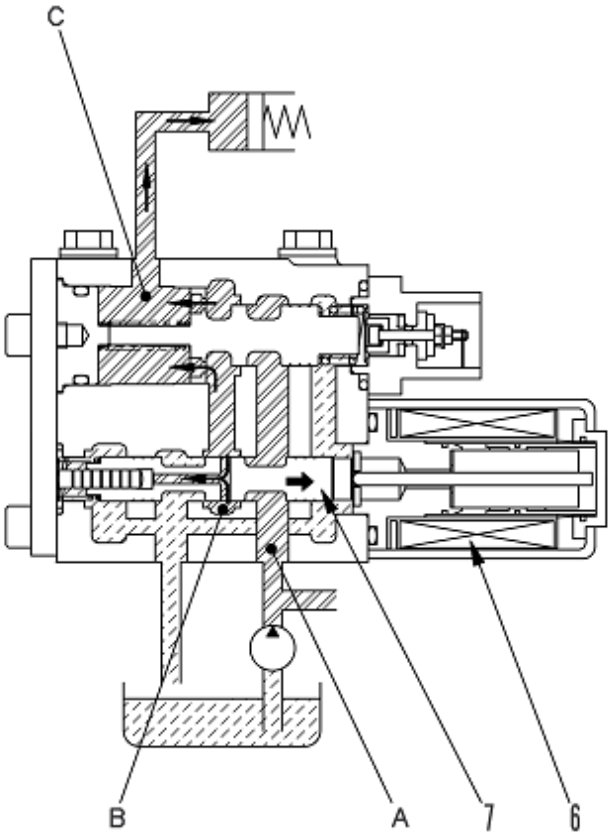


Figura 75

Cuando se termina de llenar (Cuando la válvula de control de presión es colocada en la presión inicial) (Por gentileza de Komatsu Cummins)

(Rango C en la tabla)

Después de un tiempo determinado, la corriente en el solenoide proporcional (6) es reducida al nivel de presión inicial para mover hacia la derecha el carrete (7) de la válvula de control para estrangular el pasaje entre el orificio A de la bomba y el orificio de salida B de la válvula de control de presión. Como resultado, se reduce la relación de entrada de flujo de aceite en el embrague. Por esta operación, se previenen la generación de picos de presión en el orificio C del embrague al final del proceso de llenado y el cambio de velocidad se efectúa suavemente.

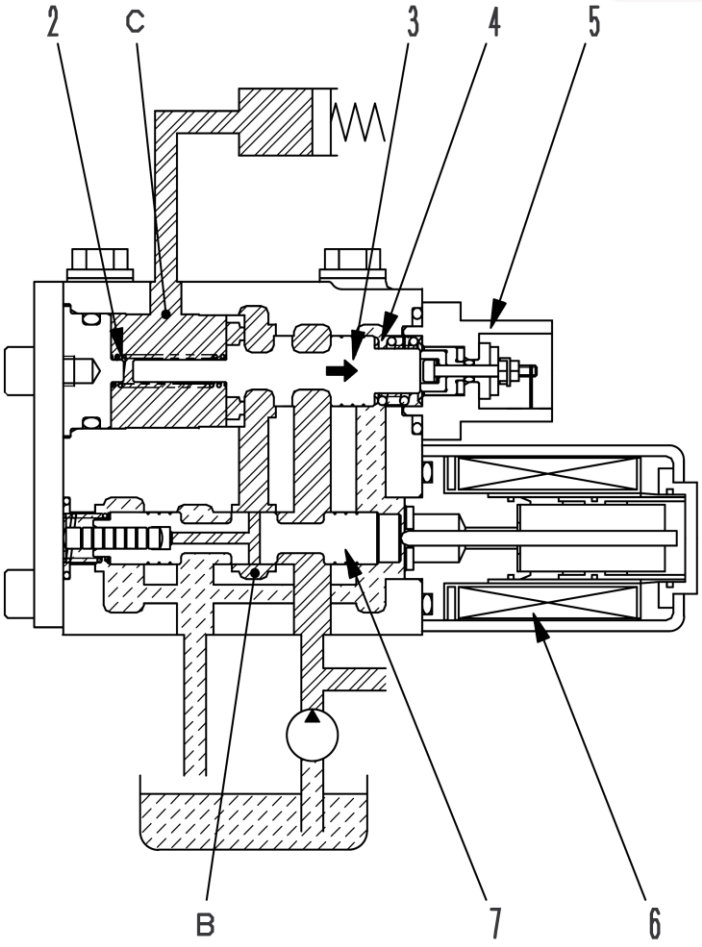


Figura 76

Si el embrague está lleno con aceite, el aceite proveniente del orificio B de la válvula de control de presión no fluye dentro del orificio C del embrague. El área receptora de presión del lado izquierdo del carrete (3) de la válvula sensora de flujo es mayor que el área del lado derecho. Por lo tanto, si se aplica la misma presión en ambos lados, el carrete (3) de la válvula sensora de flujo es movido hacia la derecha por la presión de aceite. En este momento, el carrete (3) de la válvula sensor de flujo es empujado más hacia la derecha a causa del área diferencial entre ambos lados más la tensión del resorte de retorno (2) de la válvula sensor de flujo, y esto comprime el resorte (4) del interruptor de llenado. Luego, el carrete (3) de la válvula sensor de flujo toca el interruptor de llenado (5) y notifica al controlador el final de proceso de llenado. En este momento, fluye una corriente del nivel de presión inicial hacia el solenoide (6) y la válvula (7) de control de presión es colocada en la presión inicial.

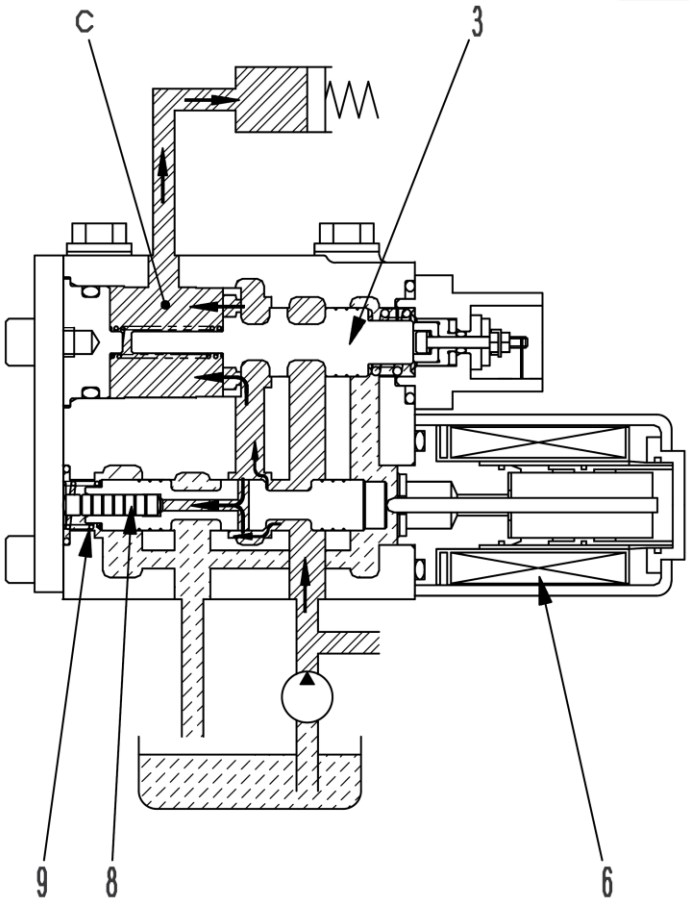


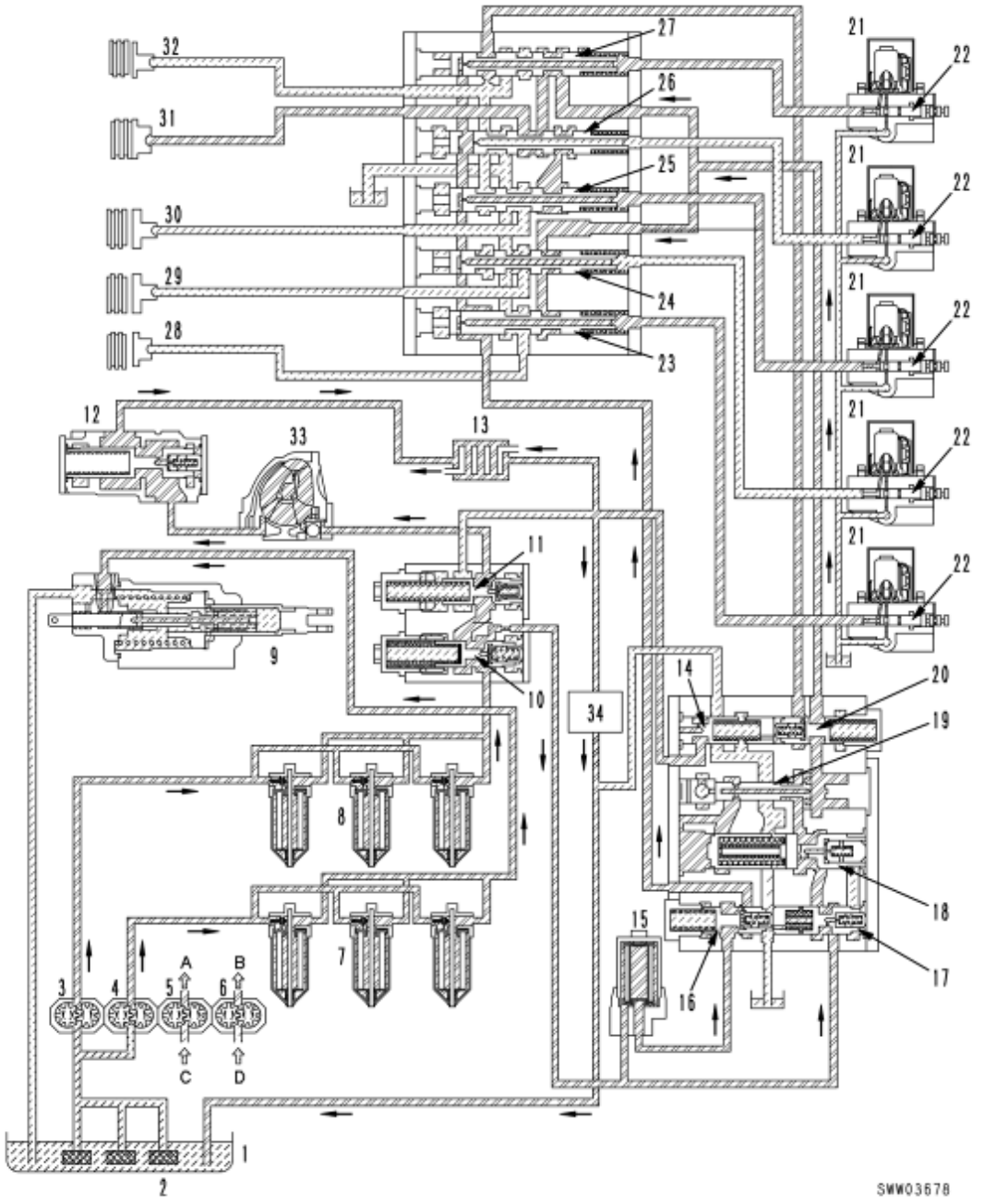
Figura 77

Ajuste de la presión (Rango D en la tabla)

Si hay un flujo de corriente en el solenoide proporcional (6) el solenoide genera una fuerza de propulsión en proporción a la intensidad de la corriente La fuerza de propulsión del solenoide está balanceada con la suma de la fuerza de propulsión del pistón de carga (8) generada por la presión del aceite en el orificio C del embrague y la fuerza de reacción del resorte (9) de la válvula de control de presión, entonces la presión queda estabilizada.

El carrete (3) de la válvula sensor de flujo es presionado hacia la derecha por medio de la presión de aceite diferencial entre ambos lados del mismo y el continua emitiendo la señal del mismo y el continua el emitiendo la señal de llenado hacia el controlador.

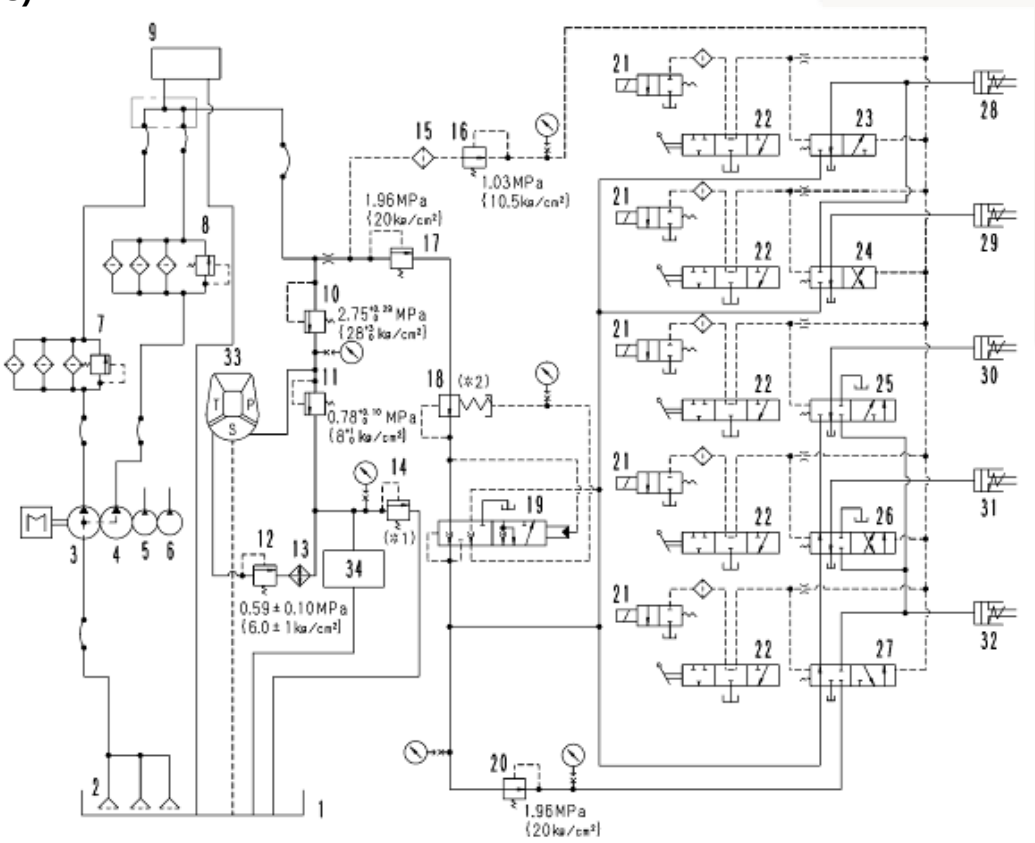
1.7 Circuitos hidráulicos de la transmisión y convertidor



A. Hacia la válvula PPC
B. Hacia la línea de frenos
C. Procedente del tanque hidráulico
D. Procedente del tanque del aceite de los frenos

Figura 78

Circuito Hidráulico de tractor de neumáticos WD-900 (Por gentileza de Komatsu Cummins)



Circuito Hidráulico de tractor de neumáticos WD-900 (Por gentileza de Komatsu Cummins)

Figura 79

1. Caja de transferencia 2. Colador 3. Bomba de carga del convertidor de torsión (SAR4-112) 4. Bomba de carga del convertidor de torsión (SAR3-100) 5. Bomba PPC (SAR1-032) 6. Bomba de los frenos (SAR1- 014) 7. Filtro de aceite del convertidor de torsión 8. Filtro de aceite del convertidor de torsión 9. Servo cilindro 10. Válvula de alivio principal	11.Válvula de alivio del convertidor de torsión 12. Válvula reguladora del convertidor de torsión 13. Enfriador del aceite 14. Válvula de alivio de la lubricación 15. Filtro del aceite piloto 16. Válvula reductora del piloto 17. Válvula de prioridad 18. Válvula moduladora 19. Válvula de retorno rápido 20. Válvula reductora 21. Válvula solenoide 22. Carrete manual de emergencia	23. Carrete de retroceso 24. Carrete de avance 25. Carrete de la 2a. marcha 26. Carrete de la 1a. marcha 27. Carrete de la 3a. marcha 28. Embrague de retroceso 29. Embrague de avance 30. Embrague de 2a 31. Embrague de 1a. 32. Embrague de 3a. 33. Convertidor de torsión 34. Lubricación de la transmisión

Valvula moduladora y de retorno rapido

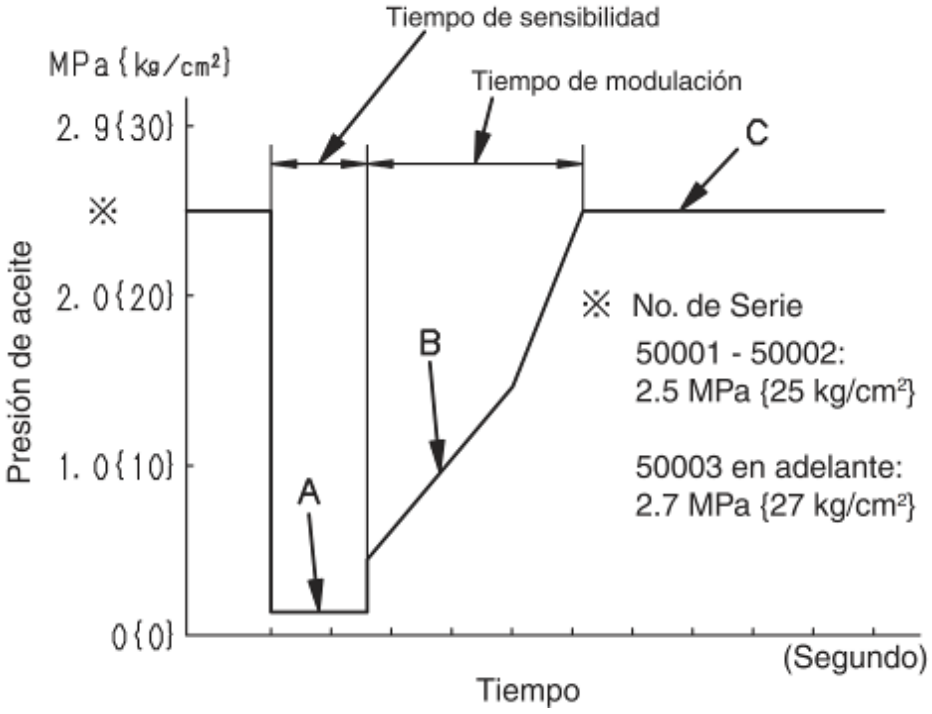
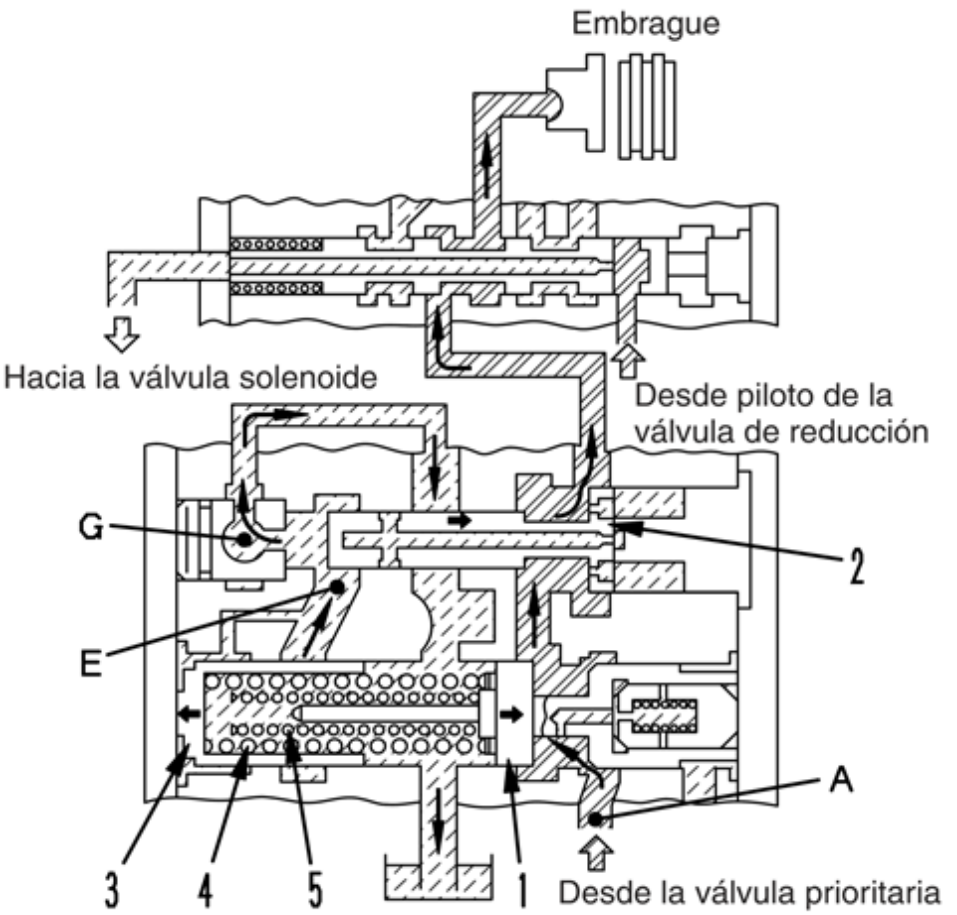


Figura 80

Grafica de modulación (Por gentileza de Komatsu Cummins)

La válvula moduladora y la válvula de retorno rápido actúan juntas para elevar suavemente la presión del embrague de la transmisión. De esta forma se reduce la sacudida que se produce al cambiar de régimen de marcha y se evita la generación de un pico de torsión en el tren de fuerza. Por lo tanto, se reduce la fatiga del operador para aportar mejor comodidad de operación y al mismo tiempo, se aumenta la durabilidad del tren de fuerza.



Inmediatamente después de cambiar de marcha (punto A) (Por gentileza de Komatsu Cummins)

Cuando se opera la palanca de cambio de marcha para acoplar el embrague, se abre la galería desde la bomba hasta el cilindro del embrague y el aceite fluye hacia el cilindro del embrague.

Utilizando la fuerza de este flujo, la válvula de retorno rápido (2) se mueve hacia la derecha en la dirección indicada por la flecha y conecta el orificio E y el orificio G. Cuando se elimina la contrapresión del pistón (3), la tensión de los resortes (4) y (5) mueven la válvula moduladora (1) hacia la derecha en la dirección indicada por la flecha. Al mismo tiempo, el pistón (3) es devuelto hacia la izquierda en la dirección indicada por la flecha.

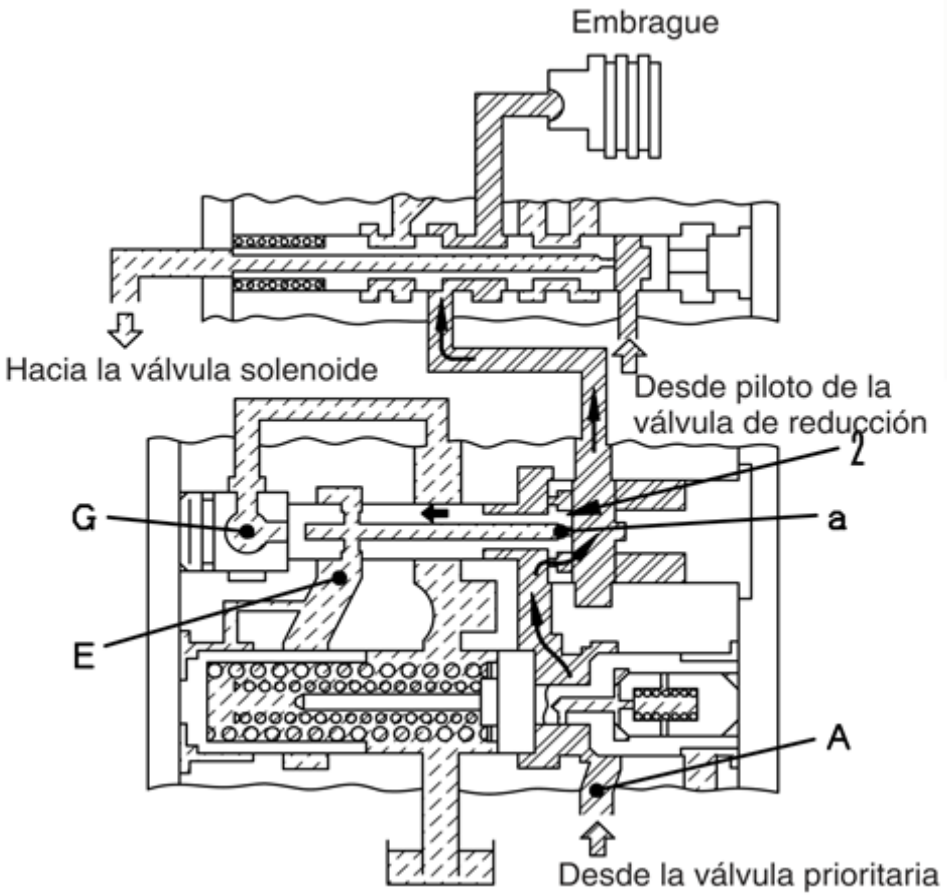


Figura 81

La presión hidráulica comienza a subir (Por gentileza de Komatsu Cummins)

Cuando el aceite a presión enviado por la bomba llena el circuito desde el orificio A hasta el cilindro del embrague, la presión hidráulica comienza a subir.

El aceite que pasa a través del orificio a de la válvula de retorno rápido (2) mueve la válvula hacia la izquierda en la dirección indicada por la flecha. Como resultado, se cierra la galería entre el orificio E y el orificio G.

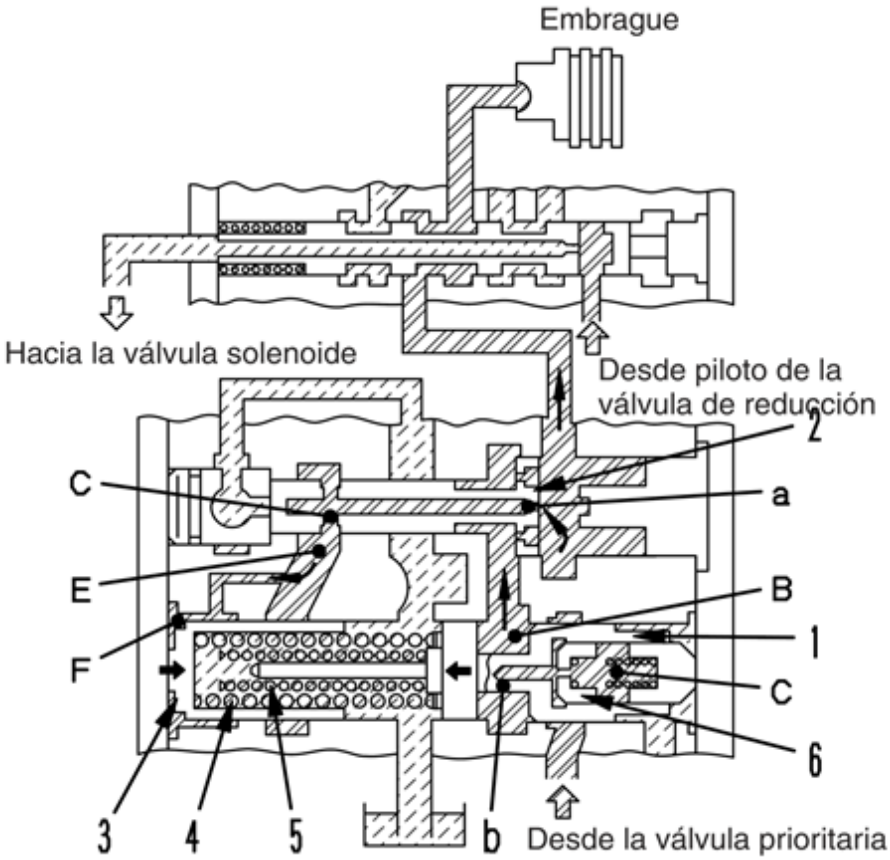


Figura 82

(**Por gentileza de Komatsu Cummins)**

Además, el aceite pasa a través del orificio b de la válvula moduladora (1) y fluye hacia el orificio C para empujar el pistón (6). En reacción a esto, la válvula moduladora (1) comprime los resortes (4) y (5) y se mueve hacia la izquierda en la dirección indicada por la flecha. Como resultado, la válvula moduladora (1) restringe la galería hacia el orificio B.

El aceite que pasa a través del orificio a de la válvula de retorno rápido (2) pasa a través de la galería central y después fluye desde el orificio c hacia el orificio E y al orificio F de contrapresión del pistón (3). Por esta razón, el pistón (3) se mueve hacia la derecha en la dirección indicada por la flecha y comprime los resortes (4) y (5).

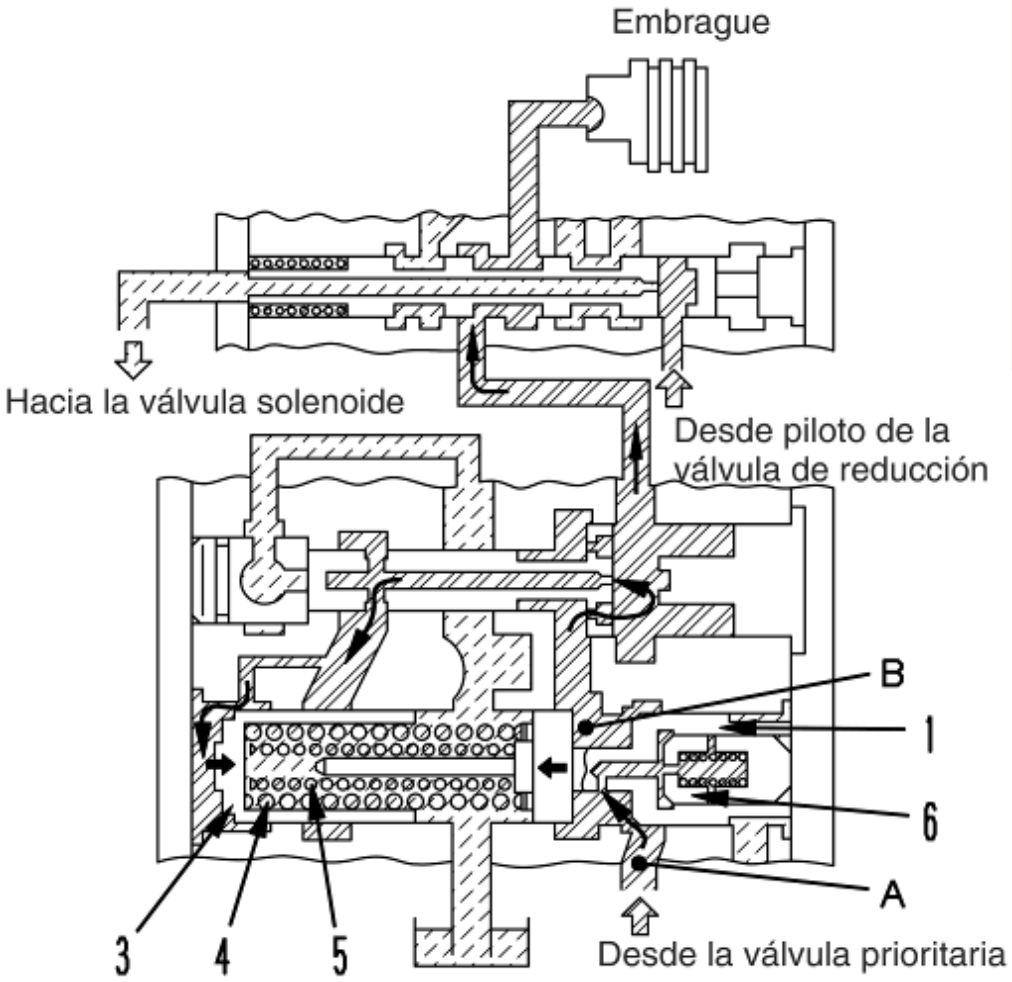


Figura 83

(Por gentileza de Komatsu Cummins)

A medida que sube la presión hidráulica en el circuito, aumenta la contrapresión del pistón (3) y el pistón (3) se mueve hacia la derecha en la dirección indicada por la flecha. La tensión de los resortes (4) y (5) abre la galería entre el orificio A y el orificio B de la válvula moduladora (1). Además, a medida que aumenta la presión que empuja el pistón (6), la reacción mueve la válvula moduladora (1) hacia la izquierda en la dirección indicada por la flecha y comprime los resortes (4) y (5)para cerrar los orificios A y B.

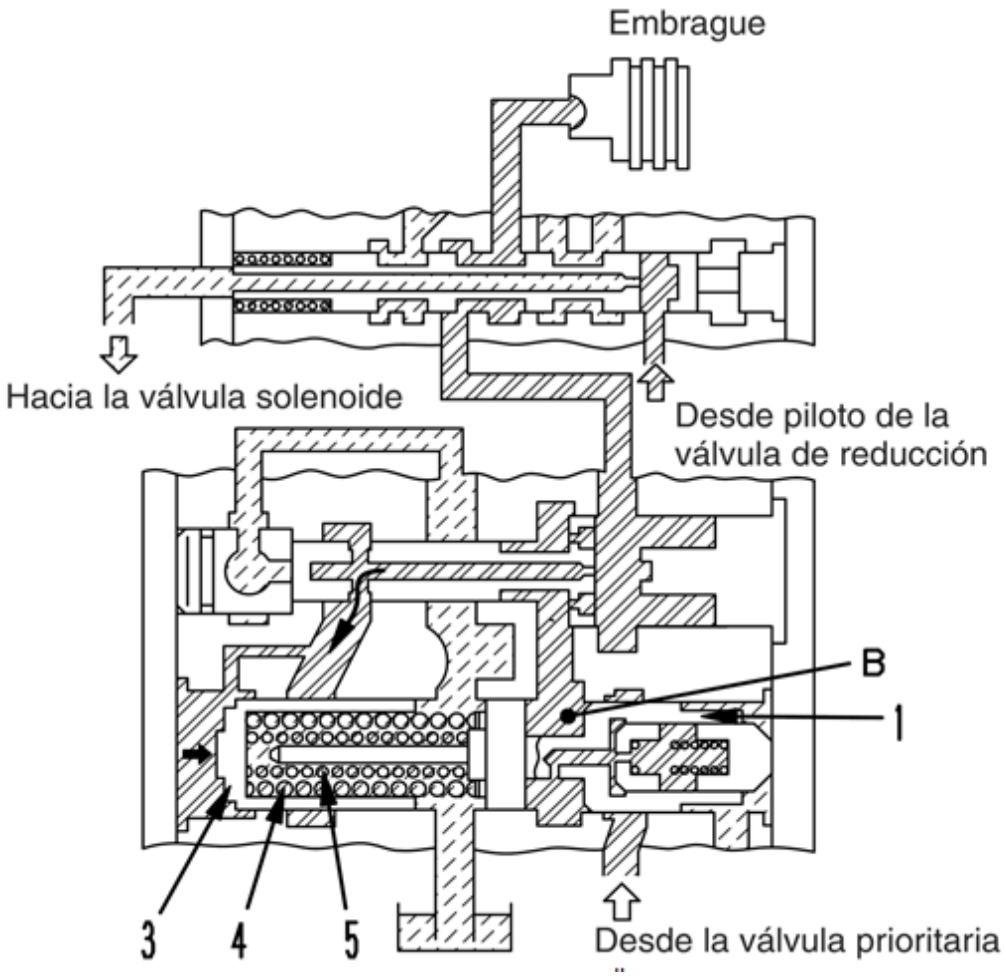


Figura 84

El ascenso de la presión hidráulica se ha completado (Por gentileza de Komatsu Cummins)

La operación descrita anteriormente se repite continuamente para aumentar la carga sobre los resortes (4) y (5). La presión hidráulica aumenta gradualmente y finalmente el pistón (3) hace contacto con el tope de la válvula y no se mueve más.
Cuando esto ocurre, la válvula moduladora (1) se detiene en una posición en que la galería hacia el orificio B se mantiene cerrada y así se completa el aumento de la presión hidráulica.

Circuitos hidráulicos de transmisiones y convertidores de torque.

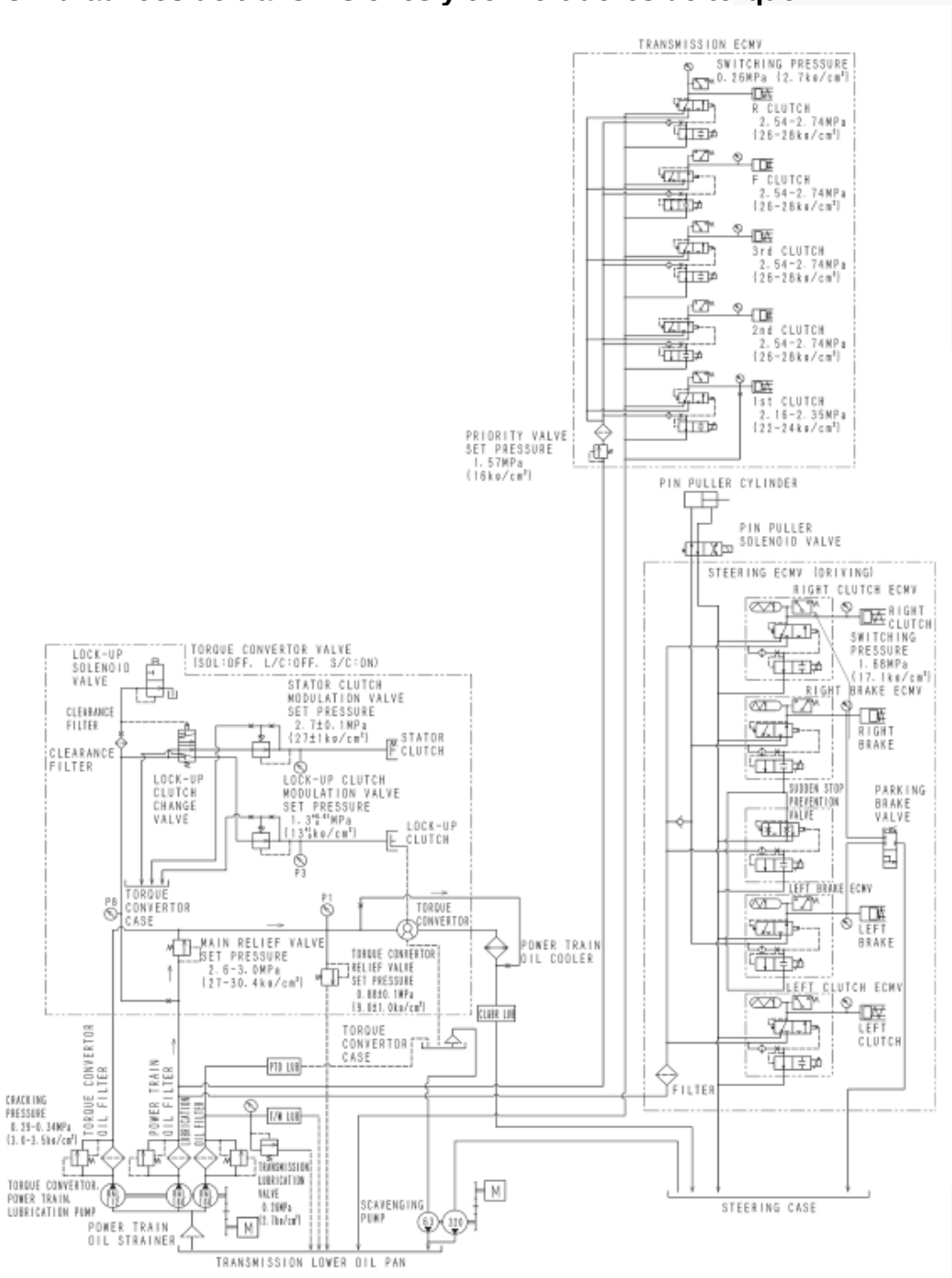


Figura 85

Diagrama de Tractor D-475 (Por gentileza de Komatsu Cummins)

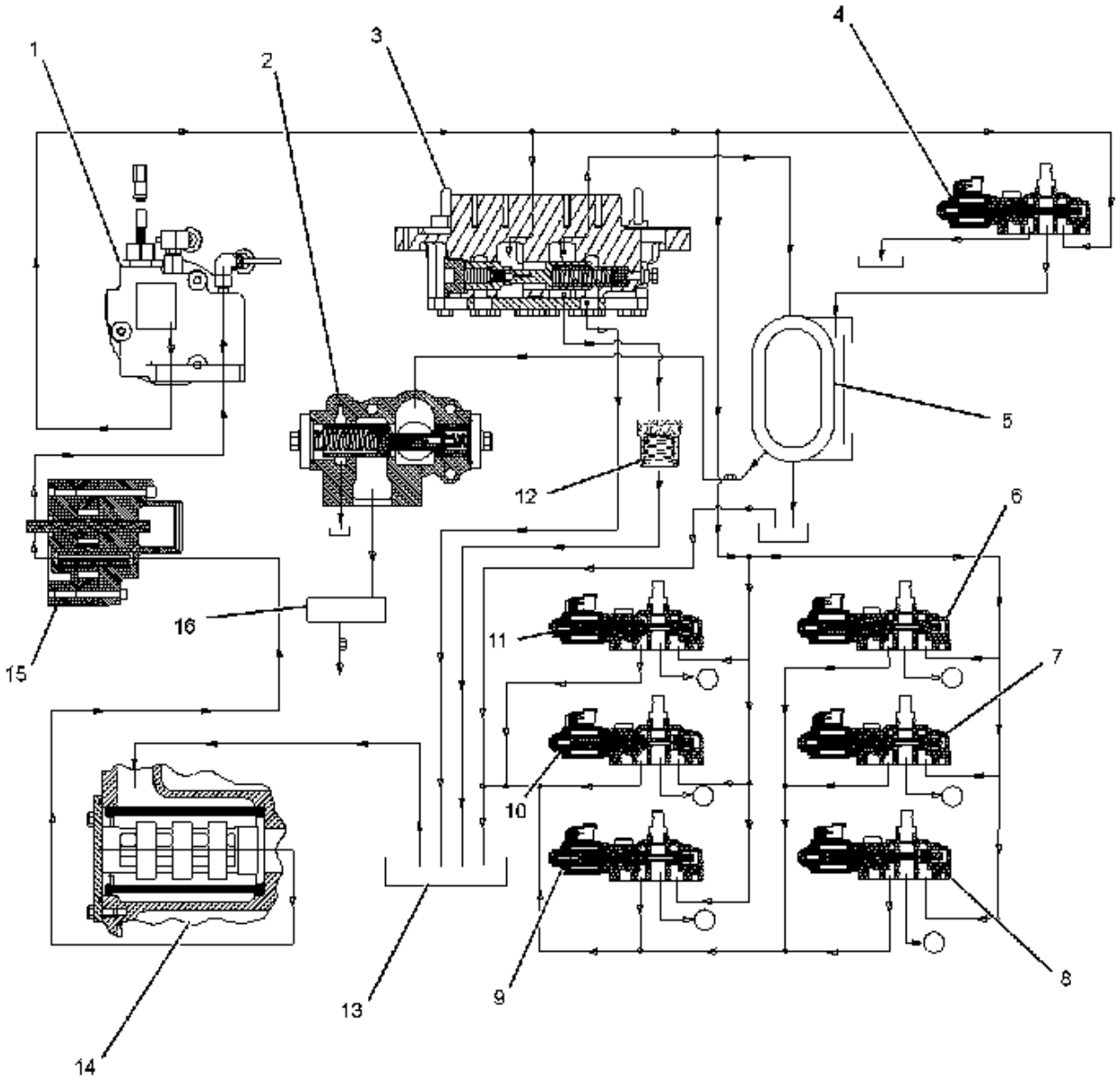


Figura 86

Diagrama de motoniveladora 24M (Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Diagrama del sistema hidráulico

(1) Filtro del aceite de la transmisión
(2) Válvula de alivio de salida del convertidor de par
(3) Válvula de alivio del control hidráulico de la transmisión
(4) Válvula moduladora del embrague de traba
(5) Convertidor de par
(6) Válvula moduladora del embrague No. 4
(7) Válvula moduladora del embrague No. 5
(8) Válvula moduladora del embrague No. 6
(9) Válvula moduladora del embrague No. 3
(10) Válvula moduladora del embrague No. 2
(11) Válvula moduladora del embrague No. 1
(12) Válvula de alivio de admisión del convertidor de par
(13) Sumidero de aceite
(14) Rejilla de succión e imán
(15) Bomba de aceite de la transmisión
(16) Enfriador de aceite de la transmisión

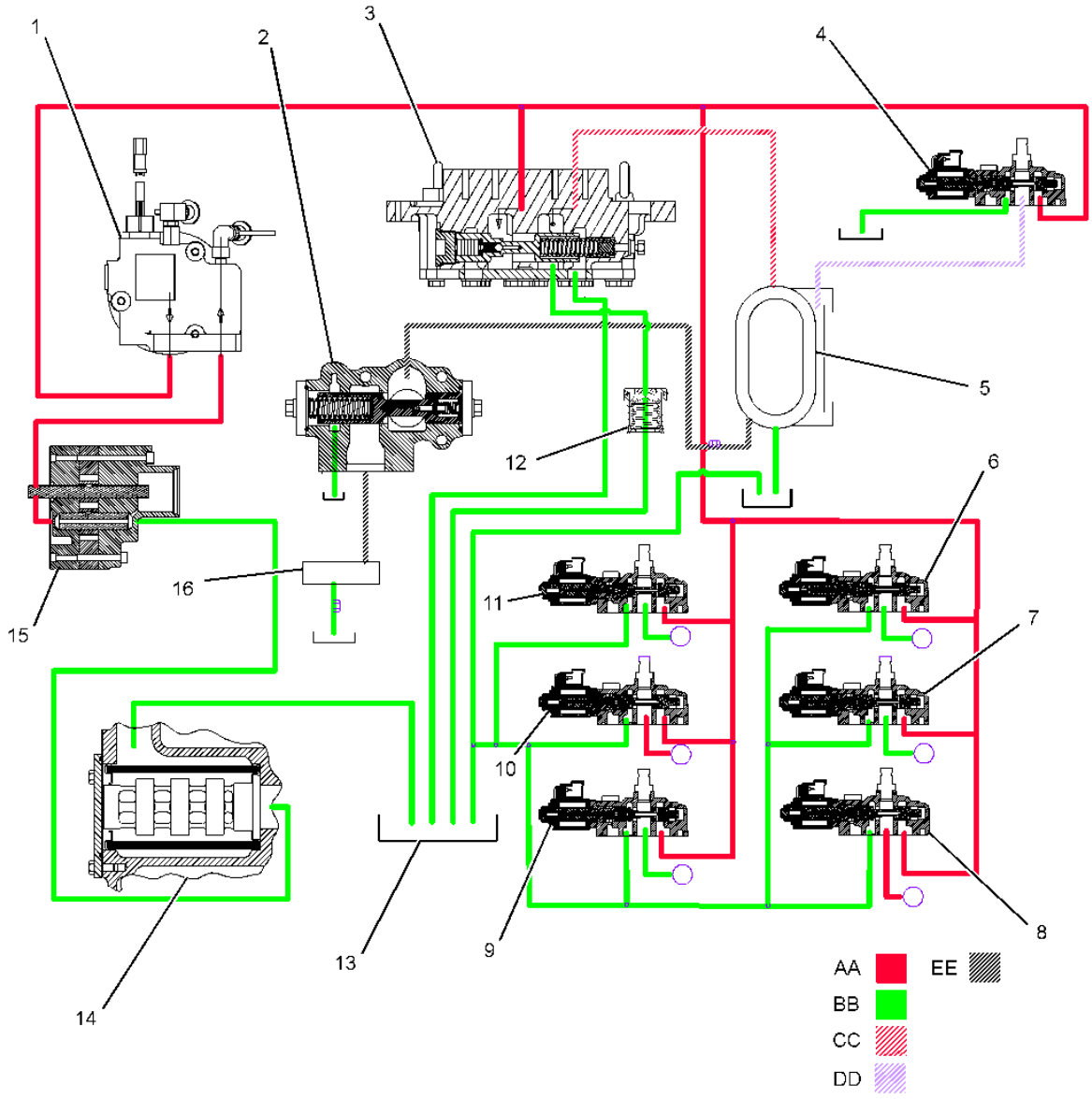


Figura 87

Condición Neutral arrancando el motor (Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)
(AA) Aceite presurizado
(BB) Aceite del tanque
(CC) Aceite de admisión del convertidor de par
(DD) Aceite del embrague del convertidor de par
(EE) Presión de salida del convertidor de par

De la imagen anterior está en la siguiente condición .Cuando se arranca el motor, la bomba de aceite de la transmisión (15) extrae aceite del sumidero de aceite (13). El aceite fluye a través de la rejilla de succión y el imán (14). La bomba de aceite de la transmisión (15) envía aceite presurizado a través del filtro de aceite de la transmisión (1). La bomba proporciona aceite presurizado a la válvula de control hidráulico de la transmisión (3) y a la válvula moduladora del embrague de traba (4). La bomba de

aceite de la transmisión (15) también proporciona aceite a las válvulas moduladoras de solenoide del embrague: (7), (8), (9), (10) y (11).

Se energiza la válvula moduladora número 4 (6) porque la transmisión está en posición neutral. Ninguna de las válvulas moduladoras restantes del solenoide del embrague (7), (8), (9), (10) y (11) proporciona aceite a los embragues de la transmisión. Las fugas del aceite presurizado se drenan hacia el sumidero de aceite (13).

La válvula de alivio del control hidráulico de la transmisión (3) envía el aceite de admisión del convertidor de par al convertidor de par (5). El aceite de salida del convertidor de par atraviesa la válvula de alivio de salida del convertidor de par (2) y se dirige hacia el enfriador de aceite (16). Después de que se enfría, el aceite se drena hacia el sumidero de aceite de la transmisión (13).

La válvula de alivio de admisión del convertidor de par (12) limita la presión máxima del aceite de admisión del convertidor de par. La válvula de alivio de admisión del convertidor de par (12) está ubicada dentro de la válvula de alivio del control hidráulico de la transmisión (3).

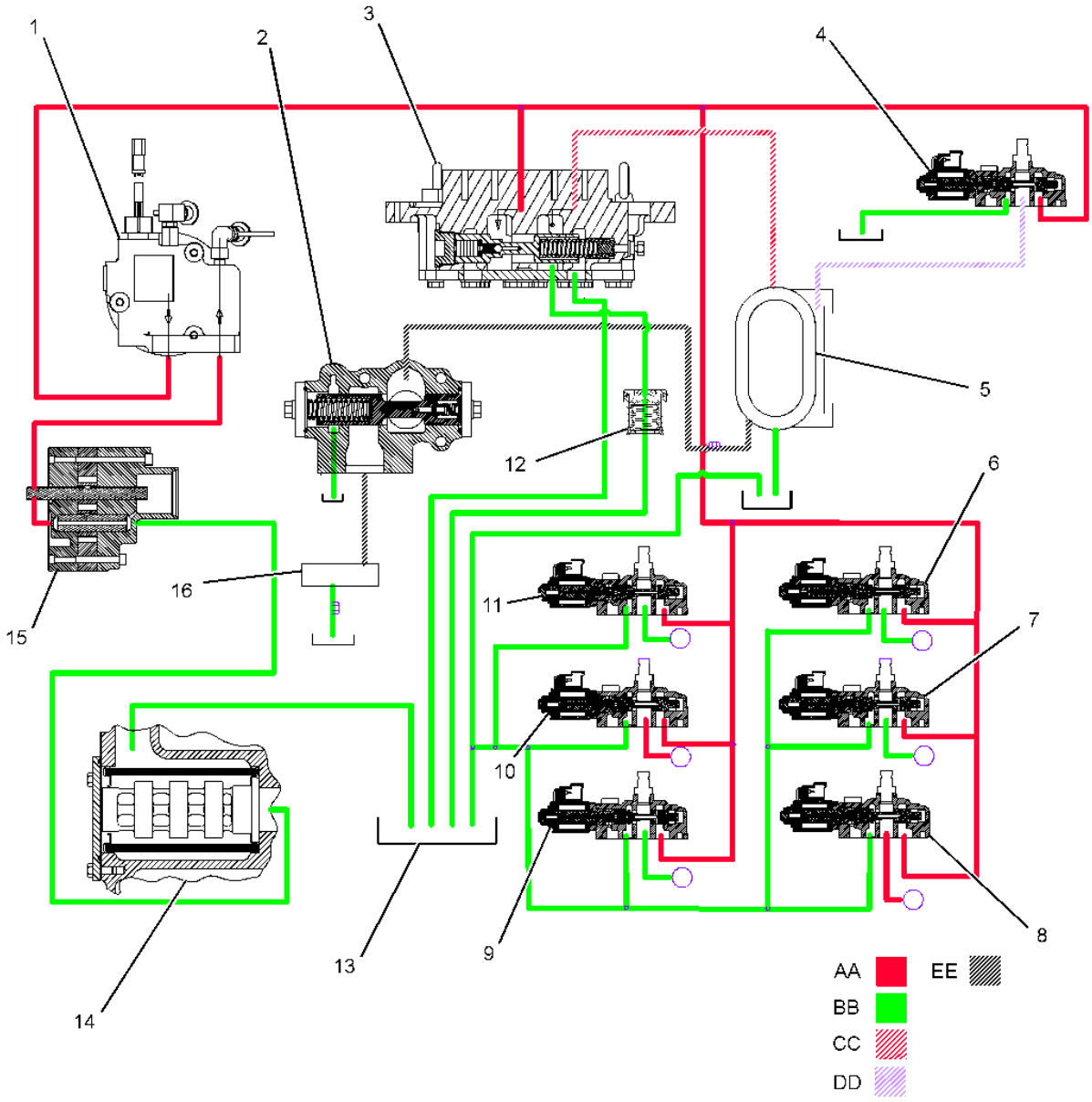


Figura 88

Cambio de la transmisión de la posición NEUTRAL a la posición de PRIMERA MARCHA EN AVANCE (Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

El ECM del tren de fuerza modula la corriente eléctrica que se envía a las válvulas moduladoras seleccionadas del solenoide del embrague. Para controlar la presión del aceite hacia el embrague de transmisión, se modula la corriente eléctrica de las válvulas moduladoras del solenoide del embrague.

Cuando se cambia el interruptor de control del sentido de la marcha de la transmisión y el interruptor de velocidad de la transmisión a la posición de PRIMERA MARCHA EN AVANCE, se energiza la válvula moduladora No. 2 (10) y la válvula moduladora No. 6 (8).

La válvula moduladora No. 2 (10) se modula electrónicamente cuando se llena el embrague No. 2. La válvula moduladora No. 6 (8) se modula electrónicamente cuando se llena el embrague No. 6. Cuando la corriente eléctrica se modula a la corriente total, el embrague No. 6 y el embrague No. 2 están a la presión plena de aceite.

Ninguna de las válvulas moduladoras restantes del solenoide del embrague (6), (7), (9) y (11) proporciona aceite a los embragues de la transmisión. Las fugas del aceite presurizado se drenan hacia el sumidero de aceite (13).

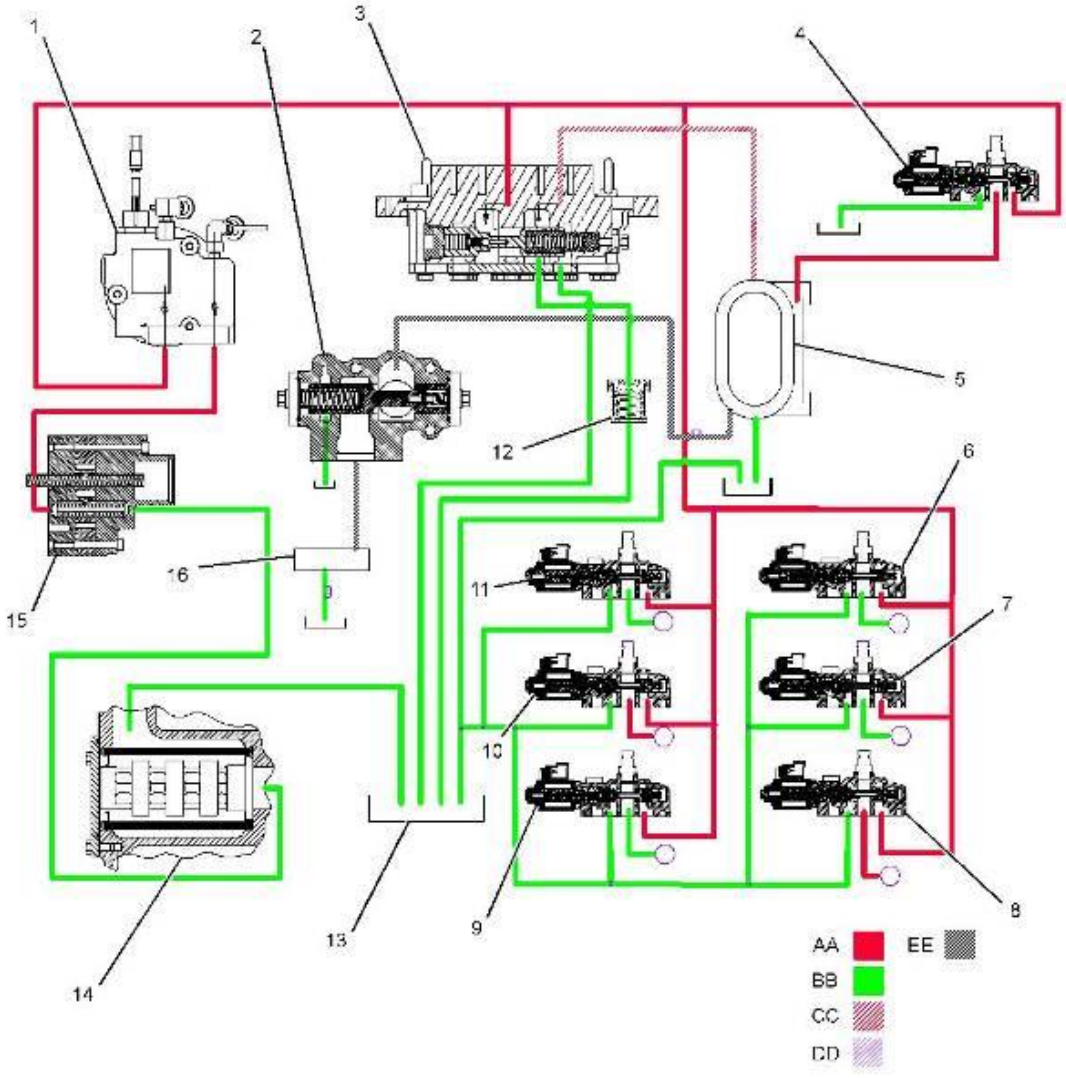


Figura 89

Transmisión en la posición de PRIMERA MARCHA EN AVANCE con el embrague de traba del convertidor de par CONECTADO (Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

El ECM del tren de fuerza modula la corriente eléctrica que se envía a las válvulas moduladoras seleccionadas del solenoide del embrague. Para controlar la presión del aceite hacia el embrague de transmisión, se modula la corriente eléctrica de las válvulas moduladoras del solenoide del embrague.

El embrague No. 2 y el embrague No. 6 están conectados. Ninguna de las válvulas moduladoras restantes del solenoide del embrague (6), (7), (9) y (11) proporciona aceite a los embragues de la transmisión. Las fugas del aceite presurizado se drenan hacia el sumidero de aceite (13).

El módulo de control electrónico (ECM) del tren de fuerza activará la válvula moduladora del embrague de traba (4) para conectar el embrague de traba correspondiente al convertidor de par (5). Cuando el embrague de traba está CONECTADO, el convertidor de par está en mando directo. El embrague de traba se desconectará si se realizan cambios de marcha de la transmisión.

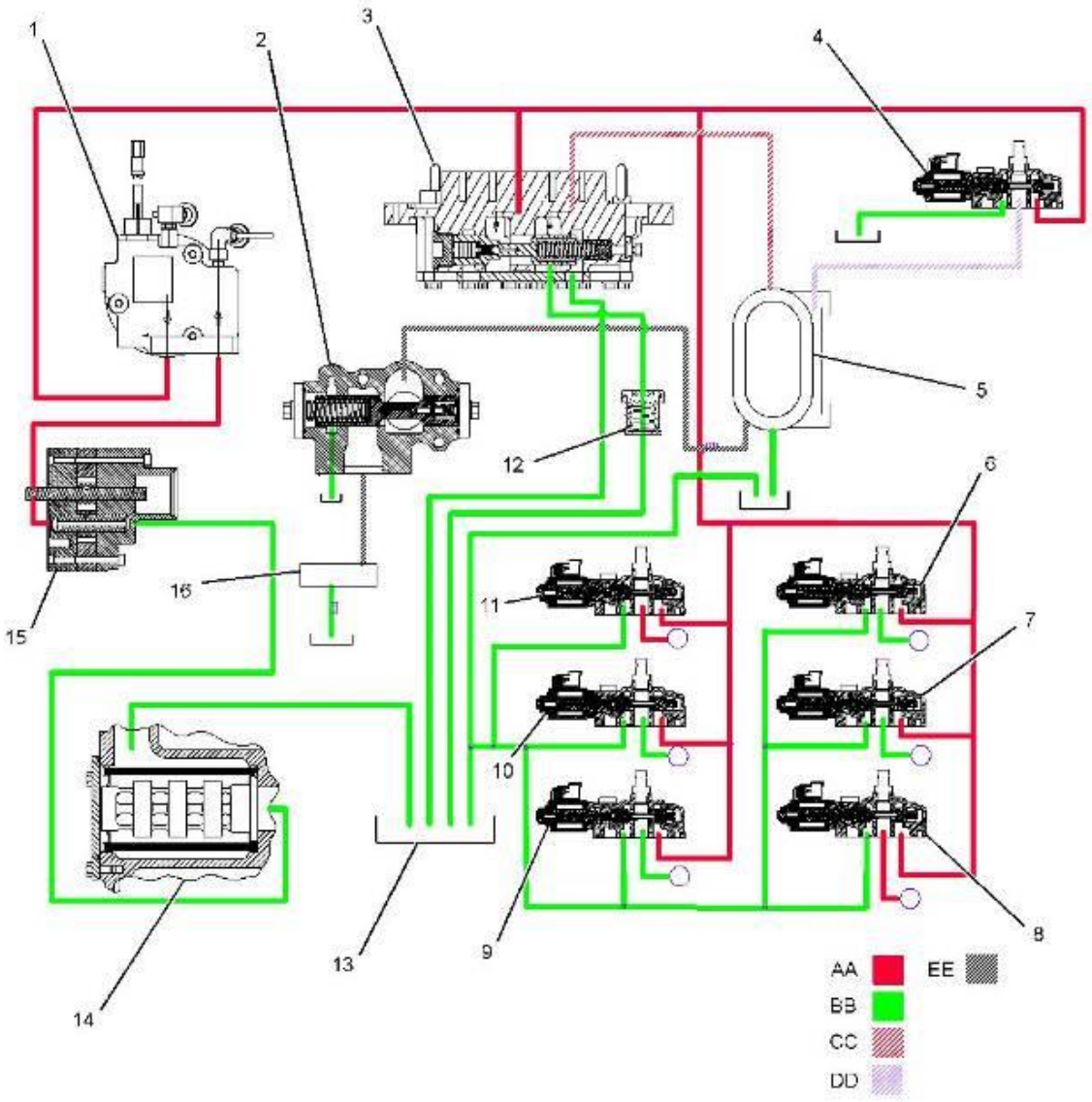


Figura 90

Transmisión en la posición de PRIMERA MARCHA EN RETROCESO (Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

El ECM del tren de fuerza modula la corriente eléctrica que se envía a las válvulas moduladoras seleccionadas del solenoide del embrague. Para controlar la presión del aceite hacia el embrague de transmisión, se modula la corriente eléctrica de las válvulas moduladoras del solenoide del embrague.

Cuando se cambia el interruptor de control del sentido de la marcha de la transmisión y el interruptor de velocidad de la transmisión a la posición de PRIMERA MARCHA EN RETROCESO, se energiza el solenoide de embrague No. 1 (11) y el solenoide de embrague No. 6 (8).

El solenoide del embrague No. 1 (11) se modula electrónicamente cuando se llena el embrague No. 1. El solenoide del embrague No. 6 (8) se modula electrónicamente cuando se llena el embrague No. 6. Cuando la corriente eléctrica se modula a la corriente total, el embrague No. 6 y el embrague No. 1 pasan a estar a presión plena de aceite.

Ninguna de las válvulas moduladoras restantes del solenoide del embrague (6), (7), (9) y (10) proporciona aceite a los embragues de la transmisión. Las fugas del aceite presurizado se drenan hacia el sumidero de aceite (13).

2. Mantenimiento del sistema de transmisión

Como todo, un buen mantenimiento de la transmisión conllevará un aumento en la vida útil, por lo que aquí le presentamos algunas recomendaciones:
Hacer cambios periódicos en el aceite de la transmisión según recomendación del fabricante.

- Cuidar que el vehículo no esté presentando problemas de calentamiento, ya que ese problema aumentara la temperatura de la transmisión y perderá vida útil.
- Velar porque la transmisión no presente fugas de aceite, ya que una transmisión sin aceite en un trayecto corto se recalentaría y se quemarían los elementos de desgaste, porque todos los componentes trabajan por fricción en las partes internas.
- A la hora de comenzar a bajar una pendiente se debe programar la marcha correcta, no se recomienda esperar que el vehículo tome velocidad para hacerlo. Si el vehículo tomo mucha velocidad, desacelerar con el sistema de retardo que posea el equipo y disminuir la marcha según sea necesario. Nunca se debe de tratar de reducir la aceleración del vehículo solo con la trasmisión ya que este esfuerzo repentino desgasta la trasmisión haciendo que su vida útil disminuya, además algunos equipos no lo permiten, ya que se deben cumplir ciertos parámetros .
- Tener presente que el motor del vehículo debe estar en buen estado para entregar la potencia necesaria para generar movimiento del tren de fuerza bajo distintas condiciones.
- No usar aditivos para cajas automáticas, ya que si la transmisión está trabajando bien no lo necesita. Cuando se usa un aditivo es para corregir o disimular algún problema que la caja automática está presentando, no utilizar aceites no recomendados por el fabricante.
- Si el equipo por alguna razón debe remolcarlo, hacerlo preferiblemente en una grúa plataforma, no es recomendable con otro vehículo. Si tiene que hacerlo con una grúa de pluma busque que las llantas que llevan la tracción sean las que se

alcen, esto porque si las llantas ruedan con el motor apagado la transmisión se daña.

Las transmisiones automáticas, supuestamente duran mucho tiempo y es muy relativo el servicio que requieren para su correcto funcionamiento; sin embargo existen razones especiales, que obligan a darles un servicio en forma periódica, de lo contrario, el tiempo de operatividad será, muchísimo menos de lo esperado.

Las razones que perjudican el buen funcionamiento de la transmisión, son:

1. Sobrecalentamiento del aceite, debido a un radiador sucio; recuerde que las transmisiones por lo general enfrían su aceite enviándolo al radiador del agua, dentro del cual tiene un enfriador especial, y sellado; el cual recorre y regresa a la transmisión en una rotación constante, valiéndose de una manguera, o línea de conexión [pipa, tubería] para la ida, y otra para el retorno.
2. Goteo de aceite, por empaque, junta, gasket, o sello retenedor de aceite vencido, tostado etc. (una transmisión con bajo nivel de aceite, patina, o arrastra antes de salir.)
3. Cable, modulador, o gobernador; fuera de ajuste o sucio; dando como consecuencia un adelanto o retardo de los cambios, logrando con esto, un exceso de patinaje en los discos de embrague (clutch); al suceder esto, el polvo o baba metálica, consecuente del patinaje ensucian o contaminan el aceite.

El aceite sucio, obstruye los conductos o pasajes, por donde recorre el aceite; y con esto podemos visualizar las consecuencias.

2.1 Tapones magnéticos y filtros.

La filtración de aceite en maquinaria automotriz e industrial es esencial para lograr un óptimo desempeño, longevidad y confiabilidad. La limpieza del lubricante es muy importante y los practicantes de la lubricación cuentan con varias opciones para filtrar y controlar la contaminación, incluyendo filtros desechables, filtros lavables, cedazos y separadores centrífugos. Este artículo se refiere a los mecanismos de separación de partículas y revisa las varias aplicaciones de los filtros y separadores magnéticos disponibles actualmente en la industria de la lubricación. Se incluye también una breve guía de los productos de filtración comercialmente disponibles.

Desde sus orígenes en el beneficio de minerales ferrosos, el magneto ha jugado un rol prominente en la separación de sólidos ferrosos de fluidos. Asimismo en el control de contaminación en lubricantes y fluidos hidráulicos en servicio, la separación magnética ha encontrado un nicho de utilidad. Actualmente, hay una buena cantidad de productos convencionales y avanzados en el mercado que utilizan magnetos en varias configuraciones y geometrías.

El Rol de los Filtros Magnéticos.

Los dueños de autos, mecánicos, operadores de maquinaria, técnicos de mantenimiento e ingenieros de confiabilidad conocen la importancia de un aceite limpio para lograr la confiabilidad de la maquinaria. Los tribólogos y analistas de aceite en uso saben también que en algunas máquinas las partículas suspendidas en el aceite pueden ser en un 90% partículas ferromagnéticas (acero o hierro). Por lo general, una o ambas superficies deslizantes o rodantes lubricadas tienen metalurgia de hierro o acero. Esto incluye superficies de fricción en engranes, rodamientos, pistones, cilindros, etc.

Es cierto que los filtros mecánicos convencionales pueden remover partículas en el mismo rango de tamaño que los filtros magnéticos, pero la mayoría de estos filtros son desechables y cada gramo de partículas removidas tiene un costo. Hay otros costos por usar filtros convencionales, incluyendo consumo de energía/electricidad, debido a la restricción al flujo causada por la media filtrante fina de la que están hechos estos filtros. Conforme los poros se tapan con las partículas, la restricción incrementa proporcionalmente, causando que la energía necesaria para filtrar el aceite se incremente también.

¿Cómo Funcionan los Filtros Magnéticos?
Aunque hay muchas configuraciones, la mayoría de los filtros magnéticos funcionan produciendo un campo magnético o zonas de carga que atrapan las partículas de hierro o acero. Los magnetos son acomodados geométricamente para formar un campo magnético que tiene una densidad de flujo no uniforme (la densidad de flujo se refiere a la fuerza magnética) (Figura 1).

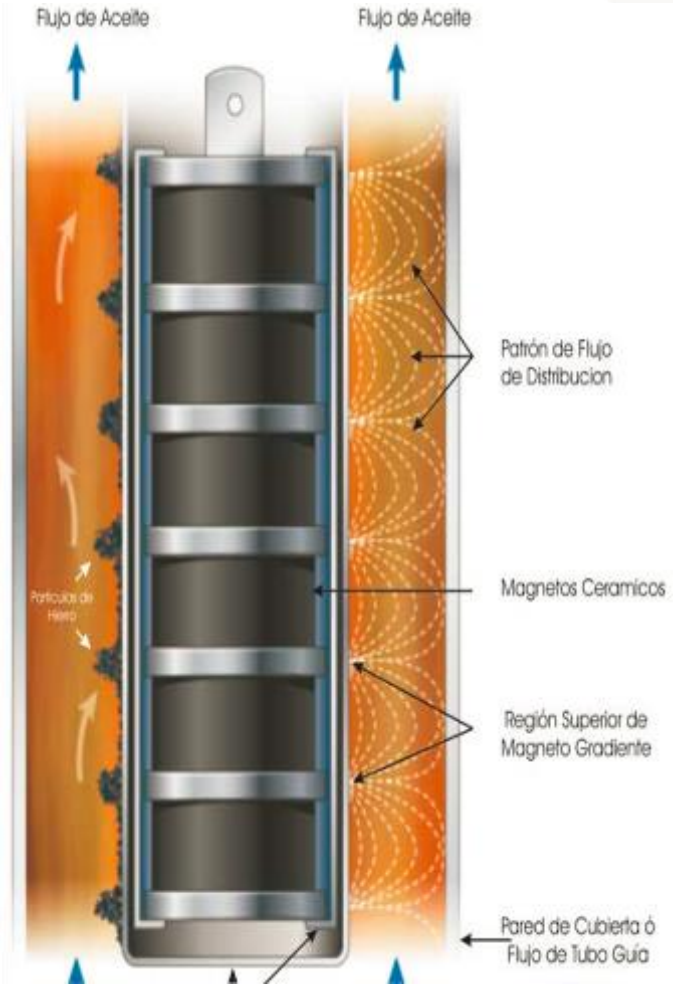


Figura 91

Figura 1. Filtro magnético mostrando el patrón de flujo y la suciedad recolectada

Las partículas son separadas más efectivamente cuando hay un fuerte gradiente magnético (la tasa de cambio del campo magnético con respecto a la distancia) de bajo a alto. En otras palabras, mientras mayor sea el gradiente magnético, mayor será la fuerza de atracción a las partículas llevándolas a la zona de recolección. La fuerza del gradiente magnético es determinada por la densidad de flujo, espaciamiento y alineamiento de los magnetos.

Se pueden usar varios tipos de magnetos en estos filtros. Las magnetos usadas en algunos filtros pueden tener una densidad de flujo (fuerza magnética) tan alta como 28,000 gauss. Compare este nivel de fuerza magnética con la fuerza del magneto en la puerta de un refrigerador de entre 60 y 80 gauss. A mayor densidad de flujo, mayor será el potencial gradiente magnético y la fuerza magnética actuando en las partículas de hierro y acero cercanas. Aunque hay muchas configuraciones de filtros y separadores magnéticos utilizados en la industria de proceso, las siguientes son clasificaciones generales para productos magnéticos comunes usados en aceites lubricantes y fluidos hidráulicos.

Figura 92

Figura 2. Filtro de tapón de drenado

Tapones Magnéticos. El tipo más básico de filtro magnético es un tapón magnético (Figura 2), en el que un magneto de la forma de un disco se pega (generalmente por adhesión) a la parte interior del tapón. Periódicamente, el tapón magnético se remueve e inspecciona en busca de partículas ferromagnéticas, las cuales finalmente son retiradas del tapón con un trapo. En la actualidad, estos tapones son comúnmente utilizados en el cárter de los motores, en cajas de engranes y ocasionalmente en tanques hidráulicos. Una ventaja útil del uso de tapones magnéticos es la posibilidad de examinar la densidad de las partículas de desgaste, como un indicador visual de la tasa de desgaste en la máquina que ocurre en un periodo de tiempo dado de operación. La apariencia de estas partículas de hierro en el magneto se describe con frecuencia por su apariencia como “aterciopelado”, “bigotes de gato” o “árbol de navidad”. Si durante una inspección normal se observa sólo aterciopelado, pero en la siguiente ocasión en vez de eso, se encuentra apariencia como de árbol de navidad, esta se considera una situación peligrosa que requiere de inspección y acciones de remedio. Después de todo, el desgaste anormal produce cantidades anormales de partículas de desgaste, que ocasionan una acumulación anormal de partículas en los tapones magnéticos.

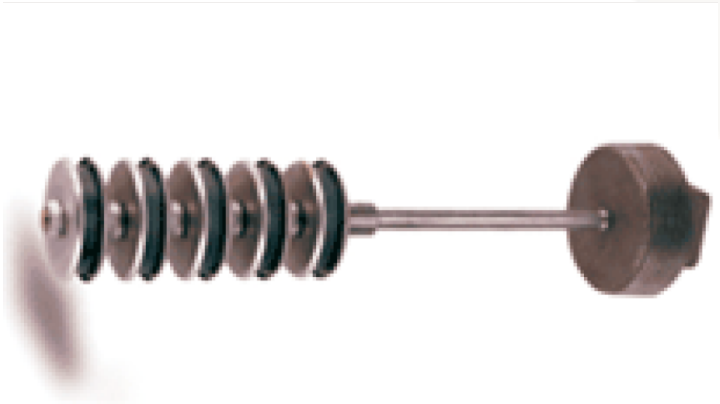


Figura 93

Magneto de tanque

Barras Magnéticas. Mientras que los tapones magnéticos se insertan en el aceite por debajo del nivel de aceite (por ejemplo en el puerto de drenado), las barras magnéticas pueden ir hacia abajo desde la tapa del tanque (Figura 3), en contenedores de filtros especiales (Figura 4) o en el tubo central de un elemento de filtración estándar. Estos colectores consisten en un serie de anillos o magnetos de forma toroidal (en forma de dona) ensamblados axialmente en una barra metálica. Entre los magnetos hay espaciadores donde el gradiente magnético encuentra su punto más alto, sirviendo como la zona de recolección de las partículas. Periódicamente las barras se remueven, inspeccionan y se limpian con un trapo o tela limpia. Un ejemplo del concepto de un filtro de barra magnética se muestra en la Figura 1. Cuando se remueve la barra, la camisa puede deslizarse fuera del centro del magneto para remover las partículas recolectadas. Estas partículas pueden ahora ser preparadas para análisis microscópico para ayudar a conocer la condición de la maquinaria.

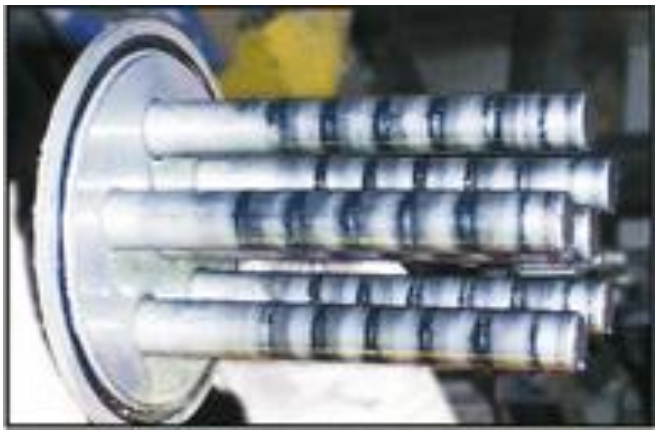


Figura 94

Recipiente

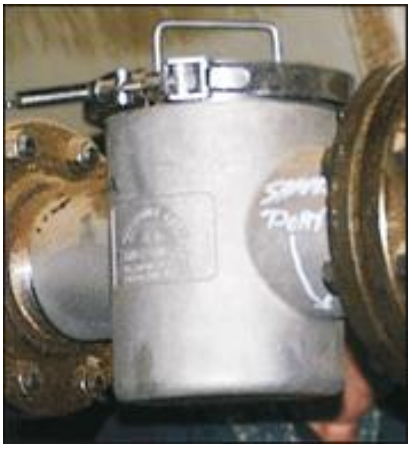


Figura 95

Recipiente de recolección de baja eficacia

Filtros Magnéticos de Flujo Interno. La Figura 5 ilustra un ejemplo de un filtro magnético disponible comercialmente en el que el flujo de aceite pasa a través del filtro. En esta configuración que es comercializada por Fluid Condition Systems bajo el nombre de MAGNOM, los magnetos se encuentran insertos entre placas metálicas de recolección que tienen ranuras de flujo específicas (Figura 6). Conforme el fluido pasa a través de las ranuras, las partículas ferromagnéticas se acumulan en los espacios entre las placas. Sin embargo, las partículas no interfieren con el flujo (bloqueando), ni presentan riesgo de que las partículas puedan ser arrastradas nuevamente por arrastre viscoso. Una ventaja de los filtros magnéticos de flujo interno es la gran cantidad de partículas que pueden retener antes de que se requiera limpiarlos. El proceso de limpieza por lo general requiere remover el centro del filtro y soplar aire con una manguera.

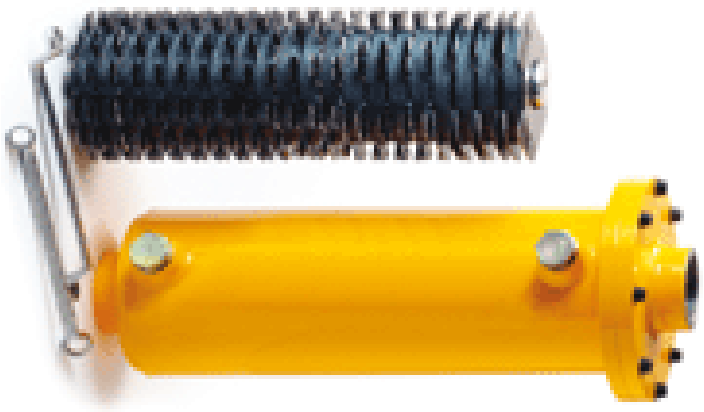


Figura 96

Flujo a través del filtro

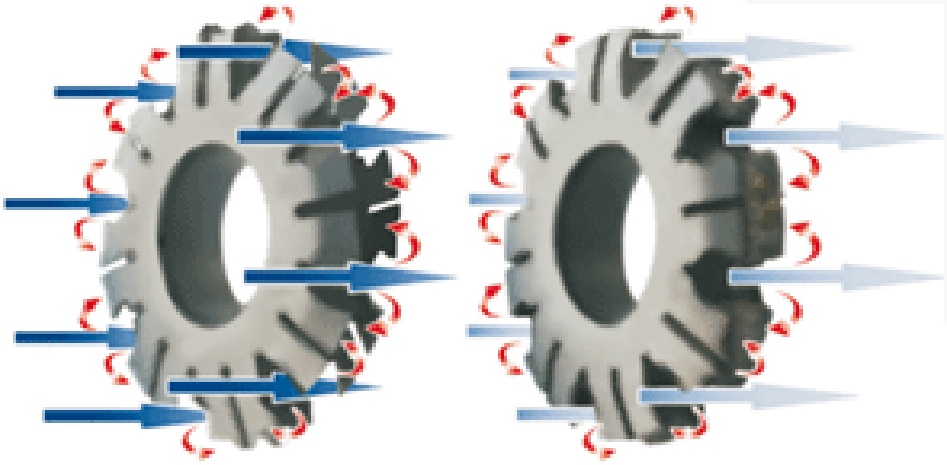


Figura 97

Placas de recolección

2.2 Inspección de tapones magnéticos y filtros

Las siguientes imágenes son de filtros y tapones magnéticos de distintos componentes del tren de potencia de equipos mineros, solo representan referencias visuales a modo de ejemplo.

Figura 98

NIVEL 1 (Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

No se observa desgaste anormal, solamente pequeñas partículas magnéticas brillantes, entre 0.5 a 2mm. El equipo puede seguir operando normalmente.

Figura 99

NIVEL 2 (Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Partículas metálicas superiores a 2mm.Estado de desgaste severo. Posibles partículas de dientes en menor escala, estas partículas producen un desgaste consecuencial. Equipo puede seguir operando, monitorear el avance del desgaste a través del aumento de frecuencia en controles de monitoreo (Aceite, Filtro, Rejillas), cruzar información con Análisis de aceite, rejillas, presiones de acoplamiento (AT1- AT2), Tiempos de acople, etc.

Figura 100

NIVEL 3 (Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Gran cantidad de partículas sobre 4 mm., desgaste en elementos mayores (engranajes, discos, piñón, etc.). Posible falla catastrófica. Programar cambio del componente en corto plazo, menor a 7 días.

Figura 101

Ejemplos de **NIVEL 1 (Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)**

Figura 102

Ejemplos de **NIVEL 2 (Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)**

Figura 103

NIVEL 3 (Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Identificación de partículas en filtros del tren de potencia.
Antes de analizar los filtros del tren de potencia, usted debe:

Figura 104

Paso1 cortar el filtro (Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

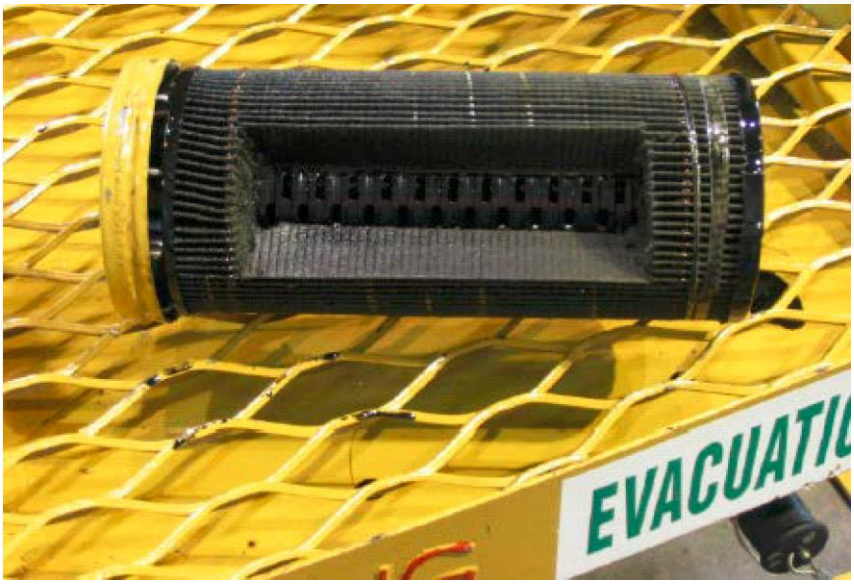


Figura 105

Paso 2 extraer un pedazo del elemento filtrante (Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Figura 106

Paso 3 extraer el exceso de aceite mediante compresión (Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Figura 107

NIVEL 1 (Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

No observan partículas anormales, solo partículas de desgaste por frotamiento de muy reducido tamaño (Normal)

Figura 108

NIVEL 2 (Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Contiene partículas brillantes, fragmentos pequeños, residuos de material de fricción. Se observa posible desgaste de los discos de embrague. Transmisión debe ser testeada, verificando todo tipo de desgaste interno. Recopilar información de Análisis de

aceite, rejillas, presiones de acoplamiento (AT1- AT2), Tiempos de acople en controlador electrónico y aumentar frecuencia de Controles (Aceite, Filtro, Rejillas)

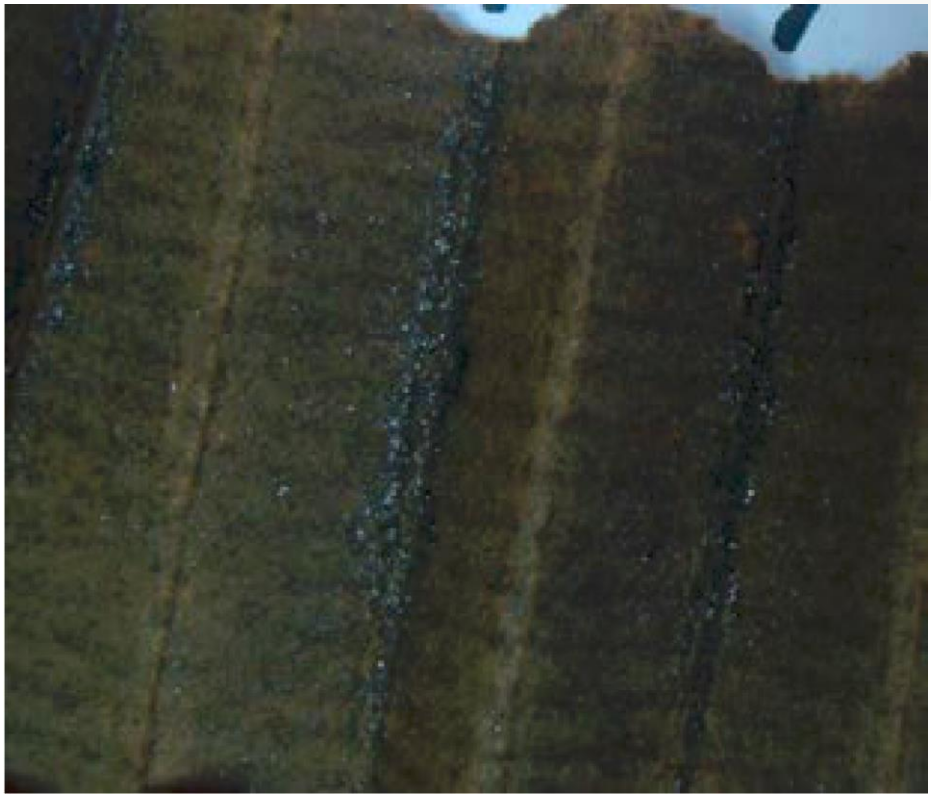


Figura 109

NIVEL 3 (Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Gran cantidad de partículas, posibles evidencias de falla catastrófica. Desgaste platos de ajuste, engranajes, rodamientos. Urgente detener el equipo y evaluar demás parámetros de monitoreo. Planificar cambio de transmisión urgente, menor a 7 días.

Inspección de tapones magnéticos en diferenciales, mandos finales y cajas de engranajes.

Figura 110

NIVEL 1: (Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Este muestra un desgaste normal. Contiene solo una pasta gris fina sin residuos o fragmentos brillantes. Listo para volver a operar después de ser limpiado el tapón.

Figura 111

NIVEL 2: (Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Altos niveles de partículas finas que muestran tempranas etapas de superficie de rodamientos y/ o desgaste de rodillos. Contiene pequeñas partículas de metal brillante pero sin grandes fragmentos. Se anotan los valores en las hojas de servicio para un

monitoreo cercano para el periodo siguiente. Listo para retornar operación después de ser limpiados los tapones.

Figura 112

NIVEL 3: (Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Partículas de metal brillante. Estado más avanzado de superficie o desgaste de rodamiento y quebraduras de rodillos. Los contenidos son pequeñas y brillantes astillas de metal. Si ambos Mandos Finales tienen contaminantes en nivel 3 entonces es un problema potencial del diferencial. Revise el tapón del diferencial. Programe el cambio del componente dentro de las próximas 500 horas.

Figura 113

NIVEL 4: (Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Falla bien avanzada del Componente siempre que esta cantidad de contaminantes se haya acumulado desde la última inspección. El contenido será una capa gruesa de

fragmentos de metal con pequeñas a grandes astillas. Si hay partículas nivel 4 en ambos Mandos Finales entonces es un problema del diferencial. Revise los tapones del diferencial. Programe cambio de componente enseguida. Si el componente no puede ser cambiado enseguida, realice monitoreo cada doce horas hasta su cambio.

Figura 114

NIVEL 5: (Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Se ha producido una falla debido a que esta cantidad de contaminantes se ha acumulado desde la última inspección y no son residuos de una falla anterior. Si hay partículas nivel 5 en ambos Mandos Finales entonces es una falla potencial del Diferencial. El contenido será una pesada capa de astillas grandes plateadas y brillantes. No permita que la máquina abandone el taller.

¡LA MAQUINA NO SE PUEDE USAR! CAMBIE TODOS LOS COMPONENTES EN FORMA INMEDIATA.

2.3 Diferenciales y mandos finales

Diseño de los sistemas básicos de ejes de impulsión

El eje de impulsión (Dibujo 1) sirve como método de transferencia de la potencia desde el motor a las ruedas. Debe cambiar la dirección del eje 90º y sirve para la reducción del engranaje. Además, debe permitir el giro de las ruedas a diferentes velocidades para que el vehículo pueda doblar las esquinas sin que una de las ruedas de impulsión se arrastre.

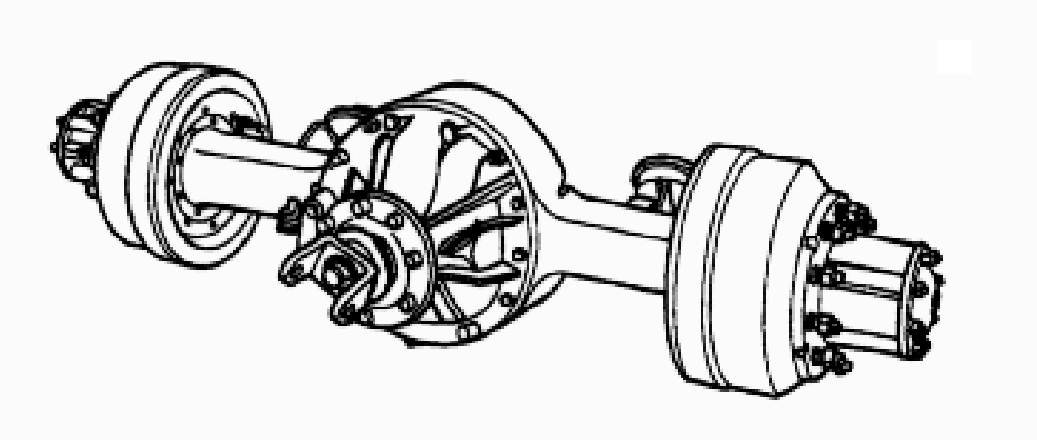


Figura 115

Dibujo 1 Eje de impulsión

El eje básico de impulsión

El eje básico de impulsión está formado por tres componentes:

- la corona dentada
- el engranaje piñón
- los engranajes diferenciales

La corona dentada

La corona dentada (Dibujo 2) es impulsada por el engranaje piñón y está montada en el porta diferencial. El porta diferencial está apoyado sobre los rodamientos. Al girar el piñón por la acción del motor a través de la transmisión, el piñón hará girar la corona dentada y al portador, realizándose así la reducción del engranaje. Este sistema de engranaje también cambiará la dirección del flujo de fuerza.

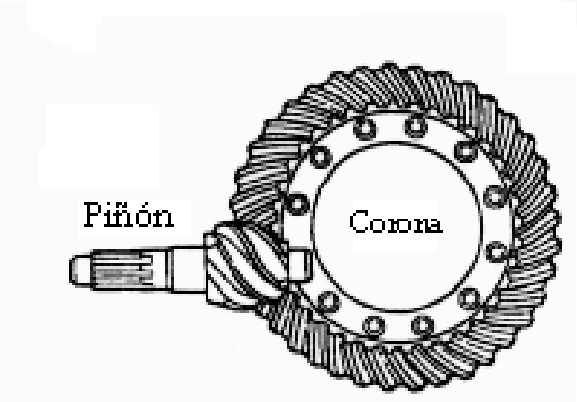


Figura 116

Dibujo 2 Engranajes de corona y piñón

Engranaje piñón

El engranaje piñón (Dibujo 2) está montada en la caja de la transmisión y está fijado a ella a través de la línea de impulsión. La potencia desde el motor se transmite a través de la línea de impulsión que hace girar el engranaje piñón.

Tipos de engranajes

- cónico espiral
- hipoide
- amboide

Cónico espiral

Los dientes del conjunto de engranaje cónico espiral son ligeramente curvos. Están montados de tal forma que las líneas de los ejes operan en el mismo plano (Dibujo 3).

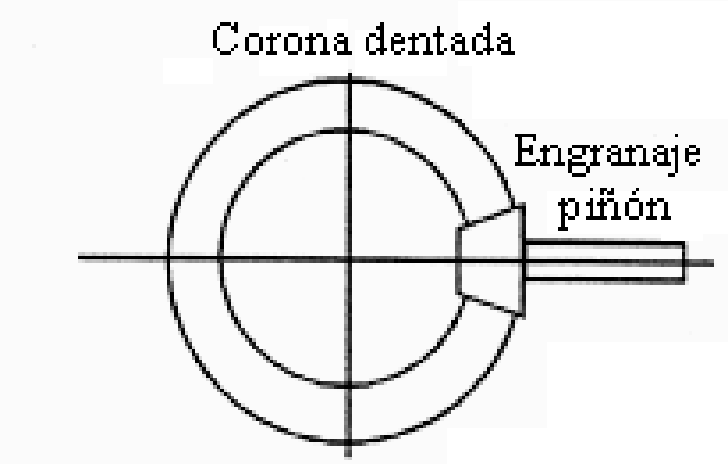


Figura 117

Dibujo 3 Engranaje cónico espiral

Hipoide

Los conjuntos de engranajes hipoides tienen sus dientes más curvados que el de los conjuntos de engranajes cónicos espirales. Se montan con las líneas de los ejes del engranaje en diferentes planos. La línea de eje del engranaje piñón está por debajo de la corona dentada (Dibujo 4). Esto ofrece mayor contacto entre los dientes y mayor capacidad de soportar carga.

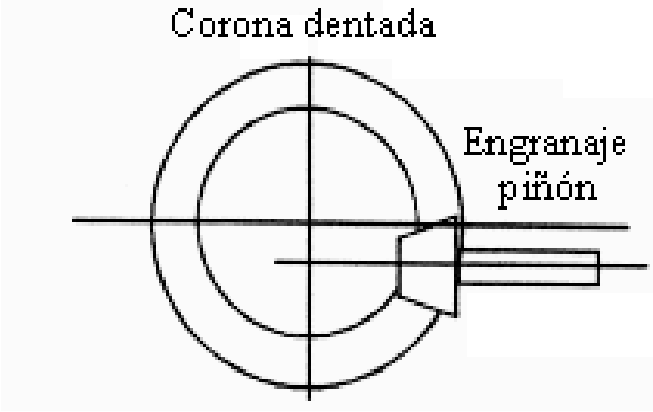


Figura 118

Dibujo 4 Engranaje hipoide

Amboide

Los engranajes amboides tienen la curva de los dientes invertidas con respecto al conjunto de engranaje hipoide y el eje central del piñón está por encima del eje central de la corona dentada (Dibujo 5). Estos conjuntos de engranajes se usan para reducir el ángulo de la línea de impulsión y la carga por choque producida por el movimiento de la línea de impulsión.

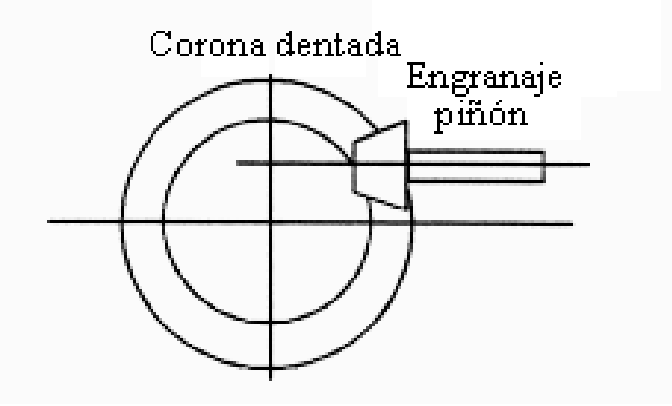


Figura 119

Dibujo 5 Engranaje amboide

Engranajes diferenciales

Si el vehículo viaje siempre en línea recta, solo se necesitará de la corona dentada y el engranaje piñón. Al realizar un giro, la rueda exterior gira más rápido que la rueda interior. Para que esto ocurra así, el eje de impulsión necesita de un conjunto de engranaje diferencial (Dibujo 6). Estos engranajes están instalado en el interior del porta diferencial que permite que cada eje gire a una velocidad diferente.

El conjunto de engranaje está formado por:

- los engranajes piñón
- engranajes laterales diferenciales

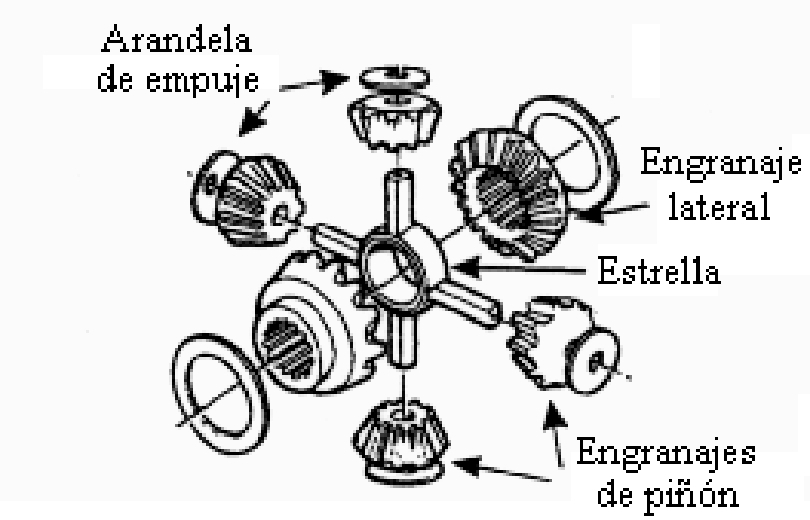


Figura 120

Dibujo 6 Engranajes Diferenciales

Engranajes piñones

Los engranajes piñones están conectados al porta diferencial por una estrella que sirva de método de impulsión de los engranajes.

Engranajes diferenciales laterales

Los engranajes laterales están ranurados sobre los ejes y están constantemente engranados a los engranajes piñones. Esto permite una distribución del impulso rotativo y la velocidad a las ruedas a cada lado del vehículo.

Dispositivo de tracción

Algunos diferenciales están equipados con dispositivos de fijación para mantener igual tracción entre las ruedas. Estos diferenciales toman diferentes nombres, dependiendo de cómo ellos controlan la tracción. Pudieran llamarse:

- diferenciales de fijación
- diferenciales de cierre
- diferenciales de desplazamiento limitado
- diferenciales no giratorios

Existen diferentes métodos para operar estos diferenciales. Algunos de los sistemas son automáticos y se ocurrirán internamente cuando el eje comience a deslizarse. Otros sistemas son accionados por el operador. Los diferentes métodos de control incluyen el:

- mecánico
- hidráulico

- eléctrico
- neumático

Estilos de ejes de impulsión
Los ejes de impulsión han sido diseñados para diferentes aplicaciones de carga. Los dos tipos básicos de ejes de impulsión son:

- de plena flotación
- semi flotante

Flotación plena
Los ejes de flotación plena (Dibujo 7) emplean un semieje que impulsa la rueda sin soportar la carga del vehículo. Los rodamientos soportan la carga de las ruedas, y se instalan en la maza de acoplamiento en un eje inmóvil (muerto), también llamado barra de carga.

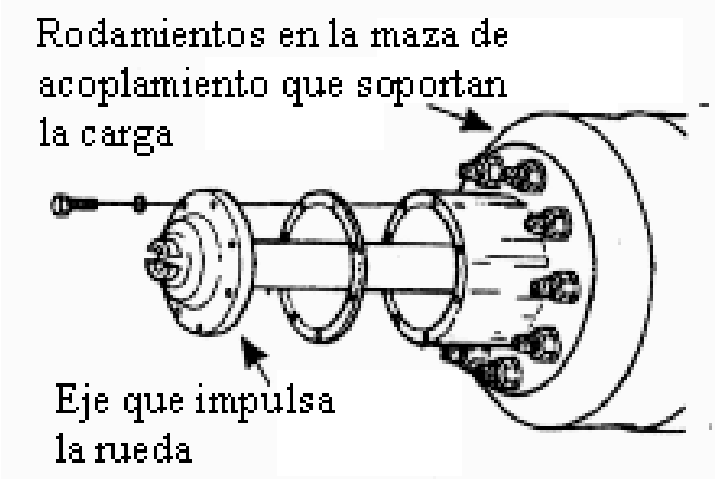


Figura 121

Dibujo 7 Ejes de flotación plena

Semi flotante
Los ejes semi flotantes soportan el peso del vehículo, además sirven de impulsores. Ellos no tienen la capacidad de soportar carga e impulsión que tienen los ejes de plena flotación por lo que se usan en vehículos de trabajo ligero.

Estilos de ejes de impulsión
Existen muchos estilos diferentes de ejes de impulsión utilizados en vehículos y equipos. Estos incluyen:

- reducción simple
- doble reducción
- velocidad simple
- dos velocidades
- montura superior
- montura frontal

Cada fabricante desarrollará y utilizará el estilo de eje de impulsión que mejor se adapte a los requisitos y aplicaciones de la máquina. El Dibujo 8 muestra un eje de impulsión de reducción simple para un motor.

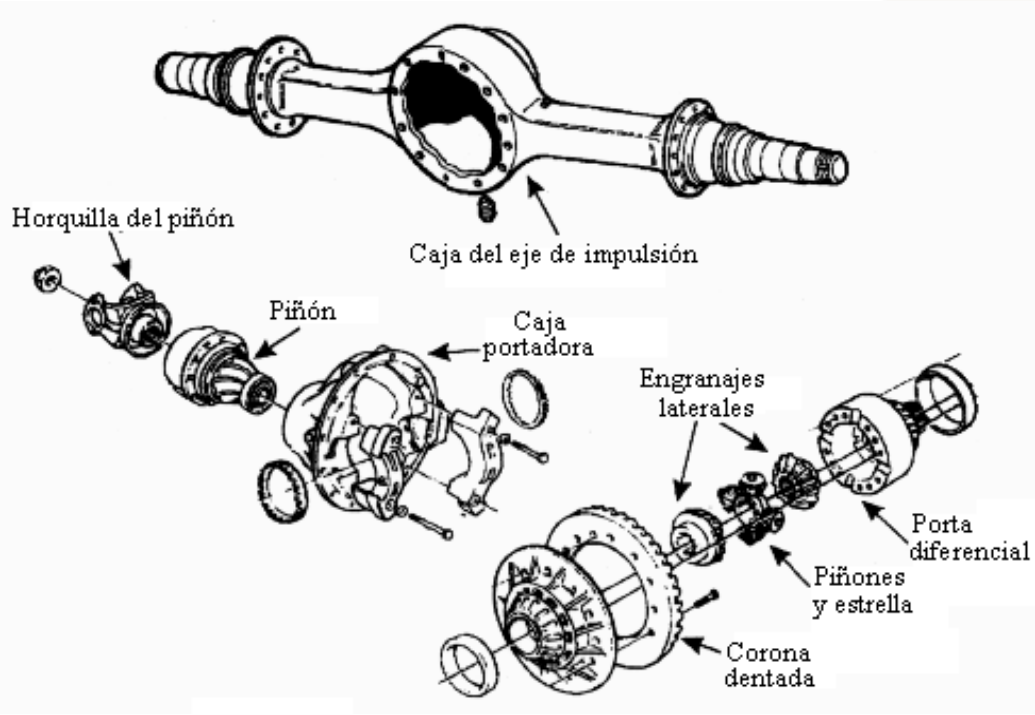


Figura 122

Eje de reducción simple

Operación del diferencial

Cuando un vehículo es impulsado en línea recta, ambos juegos de ruedas motrices girarán a la misma velocidad sin que ocurra ningún problema. Sin embargo, en cualquier momento en que el vehículo efectúe una curva o una vuelta cerrada en ángulo recto, la rueda motriz exterior debe recorrer, o cubrir, una distancia mayor que la que cubre la rueda motriz interior. Se requiere un diferencial para compensar esta variación en las velocidades de las ruedas; de aquí el término diferencial. Si no se usara diferencial, entonces las ruedas tendrían que patinar cuando dieran vuelta en la esquina, lo cual daría por resultado el desgaste rápido de las llantas, y que dificultaría controlar al vehículo mismo. La función básica del diferencial se puede ver en los diagramas de este capítulo.

Figura 123

1.-Mandos finales, 2.-Diferencial, 3.-Eje trasero (Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

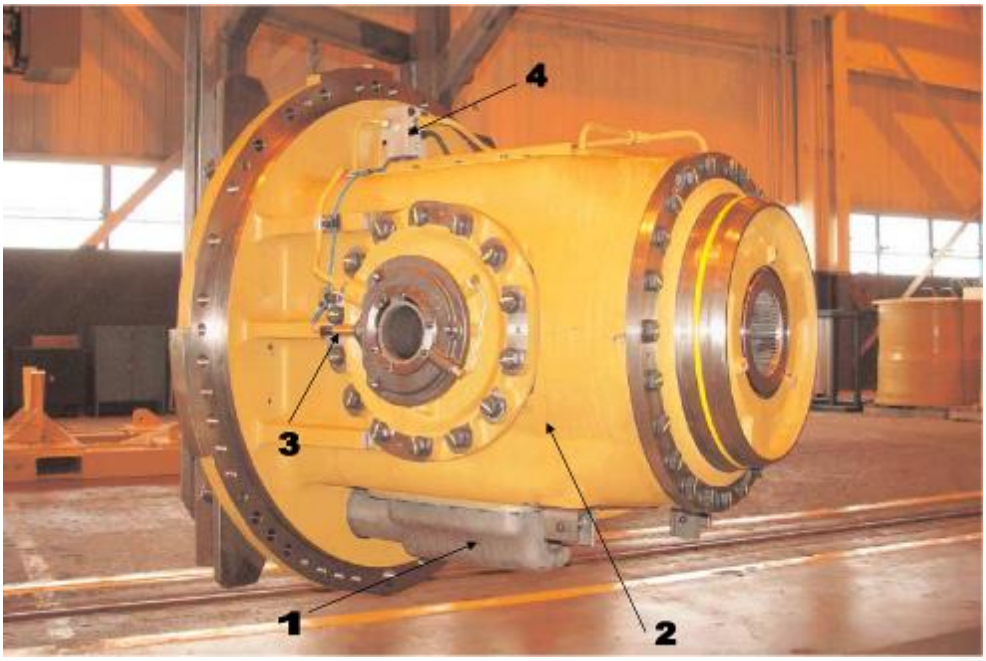


Figura 124

1.-colector o Carter diferencial, 2.-diferencial, 3.-sensores de velocidad de los ejes (tcs), 4.-valvula de alivio y distribución de aceite diferencial (Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

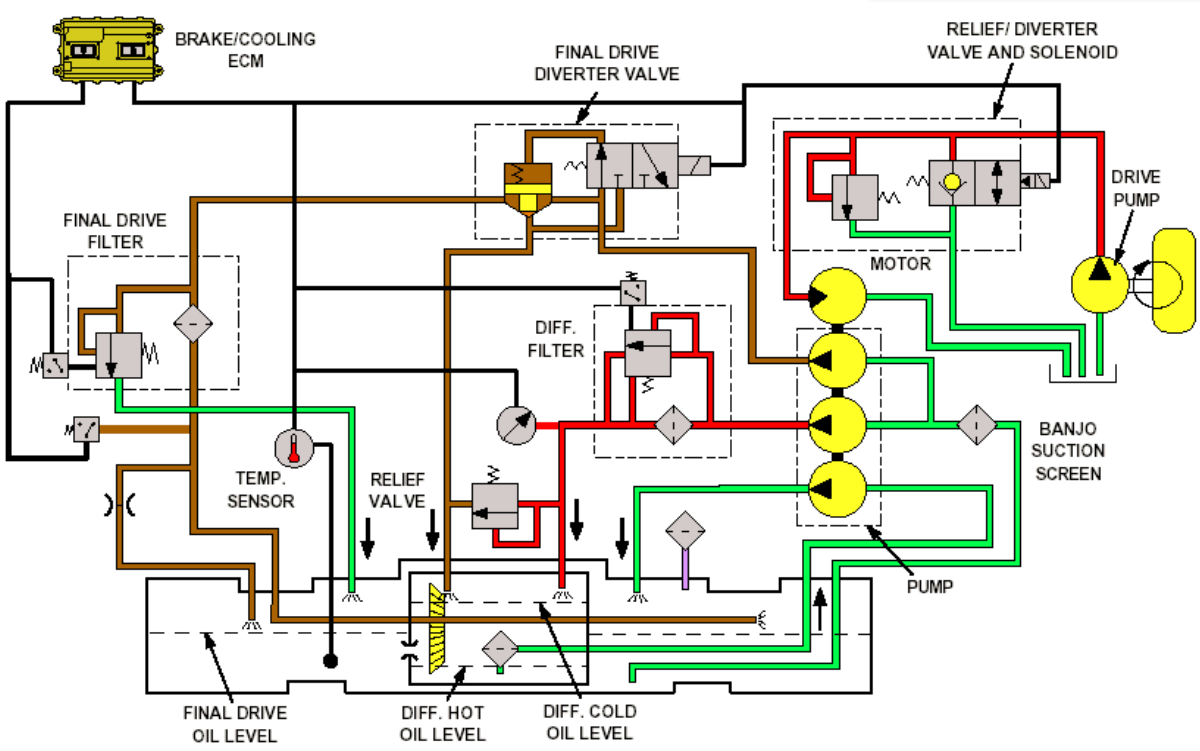


Figura 125

Circuito de refrigeración del eje trasero camión 797B (Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

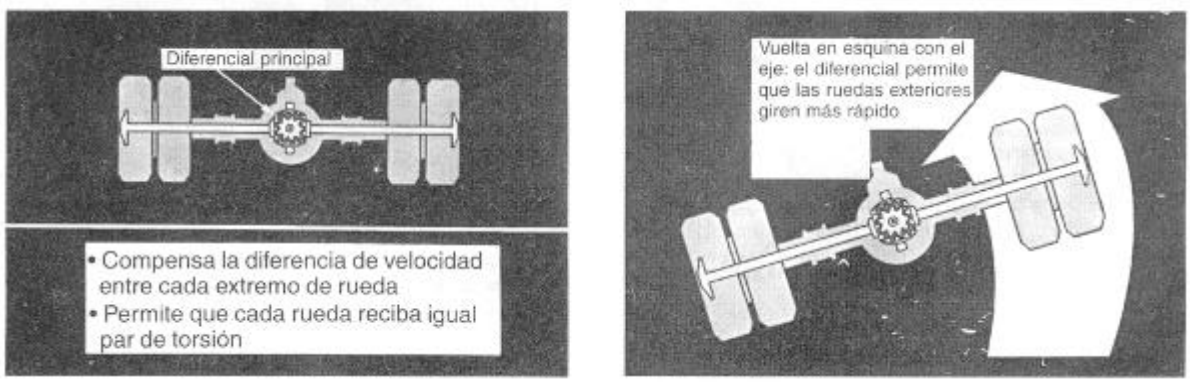


Figura 126

Dibujo A **Dibujo B**

El dibujo A ilustra las dos funciones principales de un conjunto diferencial en un camión típico con arreglo de ruedas dobles. El dibujo B ilustra la necesidad de usar una unidad de engranaje diferencial para asegurar que cuando el vehículo tome una curva en carretera, las ruedas de afuera siempre girarán más rápidamente que las ruedas interiores, debido a que la rueda exterior debe cubrir un arco más amplio de carretera. Al hacerlo así, cubre una distancia mayor que la rueda interior. Además, el diferencial compensará alguna desigualdad ligera de las llantas y condiciones disparejas del camino, dejando que cualquiera de las ruedas gire más rápidamente que las otras.

NOTA: solamente se requiere un diferencial en los conjuntos de ruedas impulsados por potencia, debido a la transferencia continua de potencia. En los miembros de ruedas no impulsadas, cuando el vehículo da vuelta en una esquina, el coeficiente natural de fricción entre la llanta y la superficie del camino hace que cada rueda encuentre su propia velocidad.

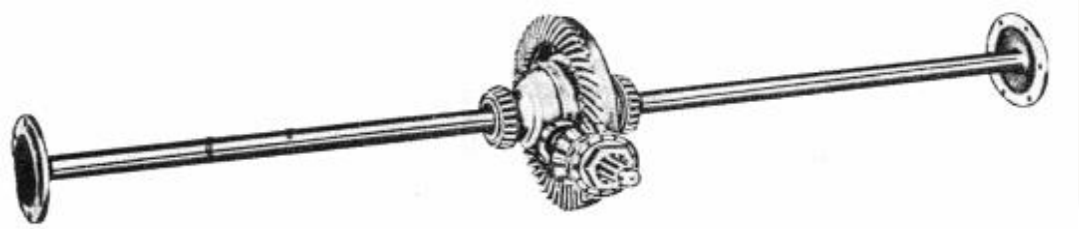


Figura 127

En el dibujo 11, la potencia de la brida trasera de la flecha propulsora se transfiere a la brida de entrada del diferencial, que está unido a un pequeño engrane (piñón) que está en acoplamiento constante con el engrane corona del diferencial (engrane grande). El engrane corona está a su vez unido a la caja del diferencial, no está unido al alojamiento el eje.

La potencia se transfiere a través de la caja del diferencial a los engranes interiores a los que están unidas las flechas de eje, completando de esta manera el flujo de potencia a las ruedas sobre el camino, puesto que el extremo exterior de los semiejes están unidos a los núcleos del tambor de freno, a los cuales también están unidas las ruedas motrices.

El engrane corona, además de estar unido a la caja del diferencial, puede estar ranurada con la caja para mayor rigidez y también para reducir el esfuerzo cortante en los pernos. El dibujo 8 muestra una vista explosionada de la caja del diferencial con las ubicaciones de los componentes surtidos que se identifican por nombre.

En el dibujo 8 la cruceta (estrella) soporta cuatro piñones laterales; cada piñón es libre de girar alrededor de la flecha de la araña, a la que está montada. Los engranes laterales están unidos a los semiejes, y los engranes laterales están en acoplamiento constante con los piñones laterales más pequeños.

El engrane corona (como se dijo antes) está unido a la caja del diferencial; por tanto, en cualquier momento que este engrane gire, también deberá girar la caja del diferencial y la araña, junto con los cuatro piñones laterales. Los dos engranes laterales más grandes unidos a los semiejes giran libremente dentro de la caja del diferencial.

Acción diferencial: línea recta

Si el vehículo se mueve hacia delante en línea recta, el flujo de potencia es como sigue (véase el dibujo 12 A el giro de la flecha propulsora impulsa a la flecha de entrada y el piñón del conjunto diferencia, que por tanto hace girar el engrane corona mayor. Como el engrane corona está unido a la caja del diferencial, la caja debe girar. La araña (cruceta) que soporta los cuatro piñones laterales (estando unido a la caja) también

girarán. Los cuatro piñones laterales que lleva la araña (cruceta) serán llevados por tanto alrededor con la caja giratoria. Con los cuatro piñones laterales en acoplamiento constante con los dos engranes laterales de los semiejes, el impulso a las ruedas motrices finalmente se separará a través del conjunto diferencial que gira. La velocidad de las ruedas los establecerá la cantidad de dientes entre el piñón de entrada y el engrane corona mayor.

Durante el movimiento del vehículo en la línea recta, el engrane corona grande está girando y haciendo girar a la caja del diferencial. Los cuatro piñones y los dos engranes laterales del eje están girando con el conjunto de caja, sin que se efectúe movimiento entre los dientes de los piñones y los engranes laterales. Por tanto, en efecto, la transferencia de potencia a través de esta parte del diferencial es parecida a la una unidad sólida.

Sin embargo, recuerde que la reducción será todavía la relación entre la cantidad de dientes del piñón de entrada y la cantidad de dientes en el engrane corona.

Acción diferencial: dar vuelta a una esquina

Cuando el vehículo da vuelta en una esquina, la rueda exterior debe cubrir una distancia mayor. Para evitar el rápido desgaste de llantas y los derrapes, ambas llantas tienen que girar a diferentes velocidades. Aquí es realmente donde el diferencial trabaja como “diferencial” para compensar esta variación que se requiere en la velocidad giratoria de cada rueda. El dibujo 12B muestra la acción diferencial en este momento.

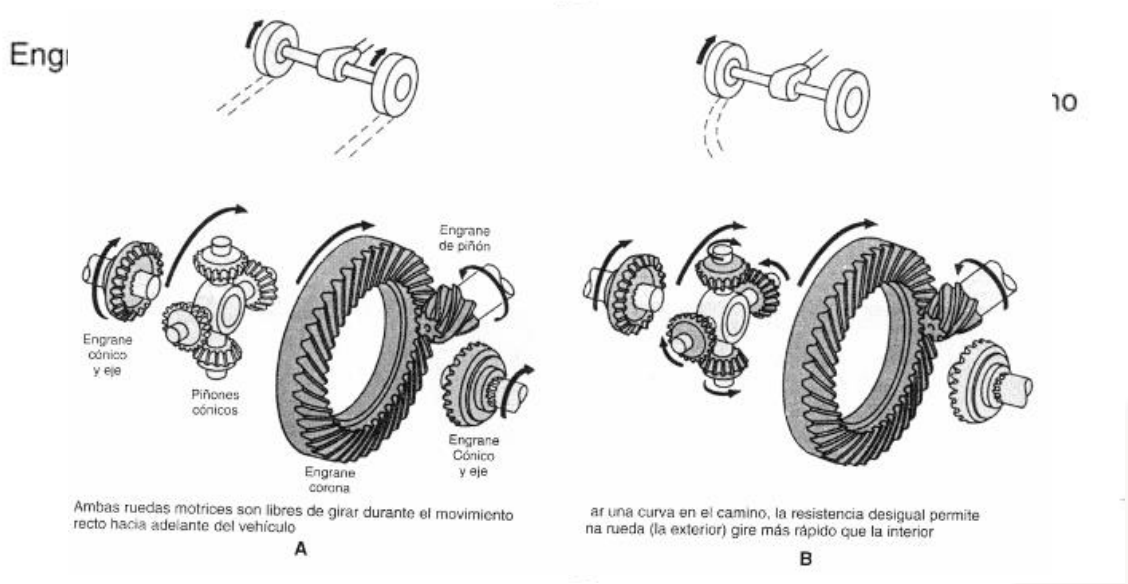


Figura 128

En el dibujo 12C, el engrane lateral derecho (rueda izquierda) debe moverse más rápidamente que el engrane lateral de la rueda izquierda o interior. Para lograr esta situación, los cuatro pequeños engranes piñón todavía girarán a la misma velocidad que lo hicieron cuando el vehículo se movía en línea recta. Sin embargo, los engranes piñón ahora han empezado a girar en su flecha (araña). Esta acción, acoplada con la velocidad hacia delante de la flecha (girando con la caja), hace que el engrane lateral

derecho (rueda exterior) se acelere y empiece a pasar a la flecha de la araña. Debido a esta reacción, un efecto de movimiento hacia reversa hace que el engrane lateral izquierdo (rueda interior) se desacelere, y permita que la diferencia de velocidad de rueda que se requiere tome la curva en el camino sin problemas para la llanta o para el manejo. Por tanto, la acción diferencial compensa cualquier variación necesaria de velocidad de las ruedas.

Sistemas de bloqueo de diferencial.

• Diferencial No Spin

El sistema No- Spin ofrece infinitas polarizaciones e incrementos de esfuerzos de tracción en comparación con cualquier otro tipo de diferencial.

Alta integridad del diseño de los sellos usados en las ruedas y en el flange para una máxima confiabilidad en los ambientes subterráneos.

En un diferencial No Spin se tiene una cruceta cuyos extremos están acoplados a la caja del diferencial y a su vez esta cruceta embraga mediante un acoplamiento dentado a los engranajes laterales.

Figura 129

En este caso el mecanismo diferencial no posee engranajes de compensación o engranajes satélites que giren sobre su propio eje. Cuando el equipo se desplaza en línea recta la cruceta se mantiene unida mediante el acoplamiento dentado a los engranajes laterales, de esta manera todo el conjunto se desplaza como un mecanismo sólido, transmitiéndose el torque en la misma proporción a ambas ruedas.

Cuando el equipo se desplaza en una curva, se produce una separación del acoplamiento dentado del eje que gira a mayor velocidad quedando de esta manera sin tracción. Por tal motivo todo el torque de entrada se transmitirá siempre a la rueda que gire a menor velocidad.

Cuando el equipo da una curva el engranaje lateral que va hacia fuera se desacopla mientras que toda la tracción se va hacia la rueda que va por dentro. La rueda exterior gira “loca”.

En el caso de que una de las ruedas del equipo se estancara sobre una superficie fangosa, esta tendría tendencia a patinar por lo que el mecanismo No Spin la desacopla inmediatamente enviando toda la tracción a la otra rueda, de esta manera el equipo puede salir del atolladero con facilidad.

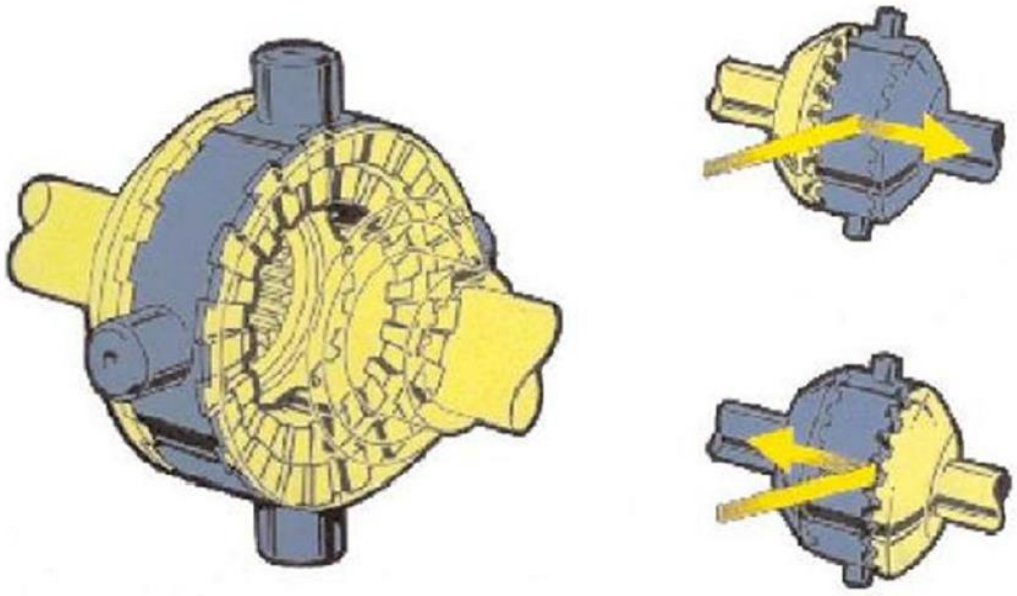


Figura 130

Un mecanismo No Spin posee resortes que mantienen embragados la cruceta y el acoplamiento dentado. Los resortes empujan también los engranajes laterales contra la caja del diferencial.

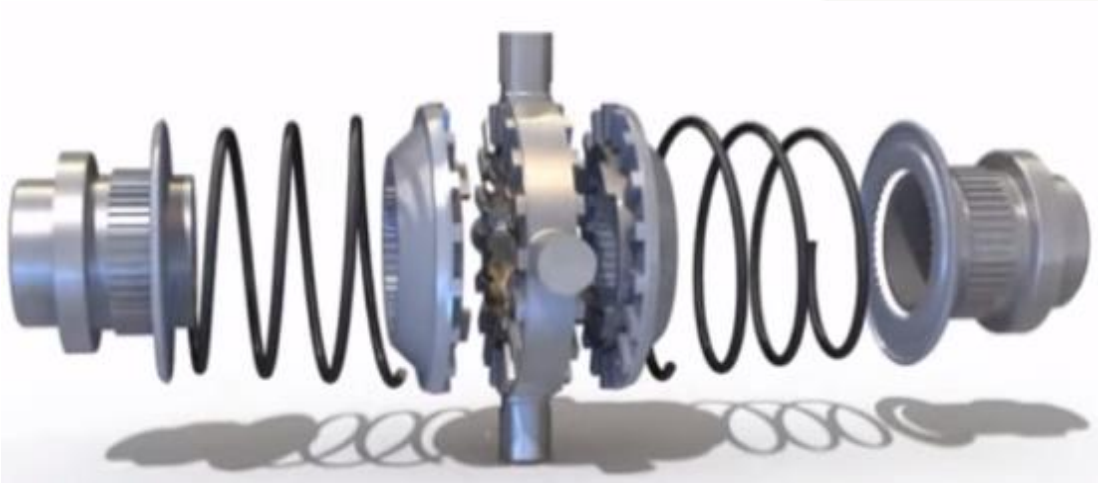


Figura 131

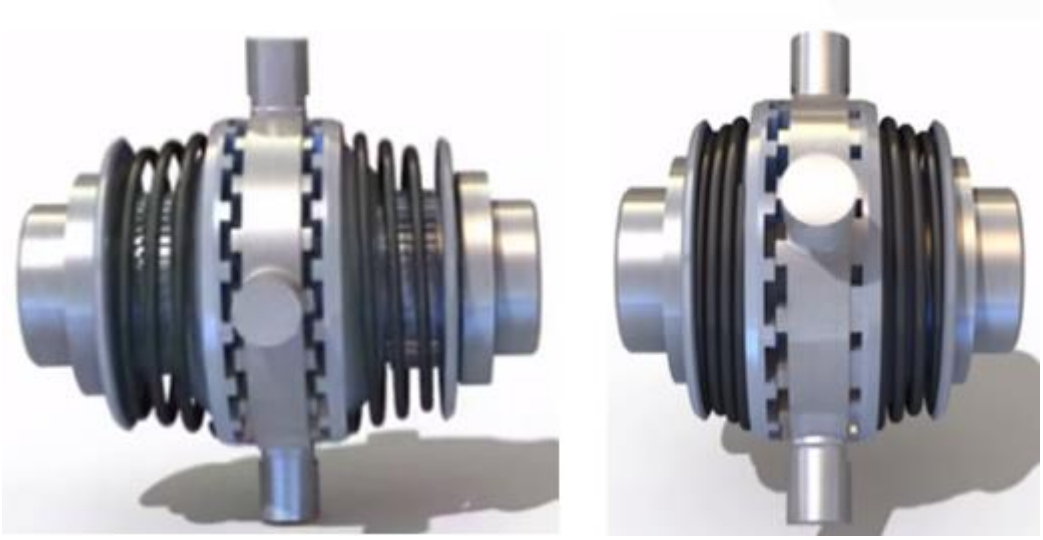


Figura 132

Operación del sistema No Spin.

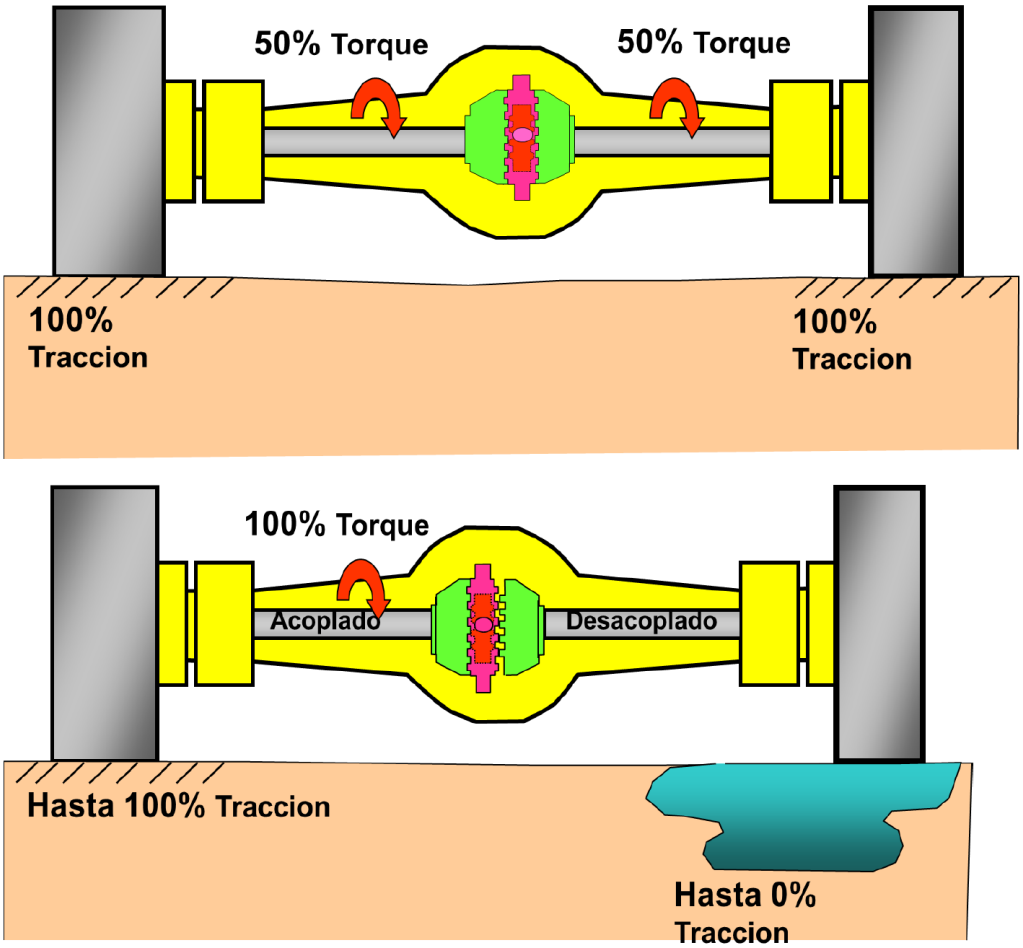


Figura 133

Distribucion de Torque en un eje con diferencial No Spin

Eje Compacto Interior: con Frenos y engranajes reductores dentro de la funda del eje (No lleva tambor de freno ni cubos) . El flujo de potencia Llega al piñón de ataque, fluye a través de la corona cónica del diferencial, y por los engranajes del diferencial a los engranajes reductores planetarios y luego a través de los semiejes pasa a las ruedas.

En este tipo de ejes, los semiejes(son de mayor diámetro) y están soportados por rodamientos de rodillos cónicos, mueven directamente unas bridas que accionan los aros de los neumáticos. Tienen la ventaja de ser mas hermeticos y menos sensibles a las fugas que los tipos compactos exteriores.

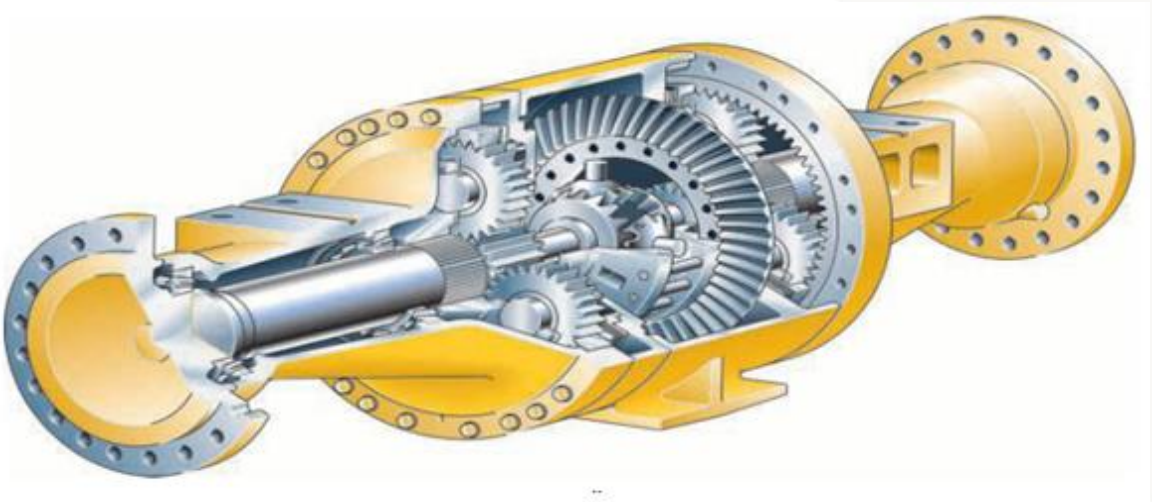


Figura 134

Direferencial de equipo subterraneo scoop (tipo compacto interior)

Mandos finales

Los mandos finales planetarios de alta reducción desarrollan potencia en las ruedas a la vez que mantienen bajas las cargas de torsión en los ejes y en la transmisión. Los Sellos Flotantes Anulares Duo-Cone retienen el lubricante e impiden la entrada de la tierra. Los aceros de aleación especiales y los procesos de termo tratamiento aseguran la larga vida útil de los engranajes. Las unidades planetarias pueden sacarse independientemente de las ruedas y los frenos.

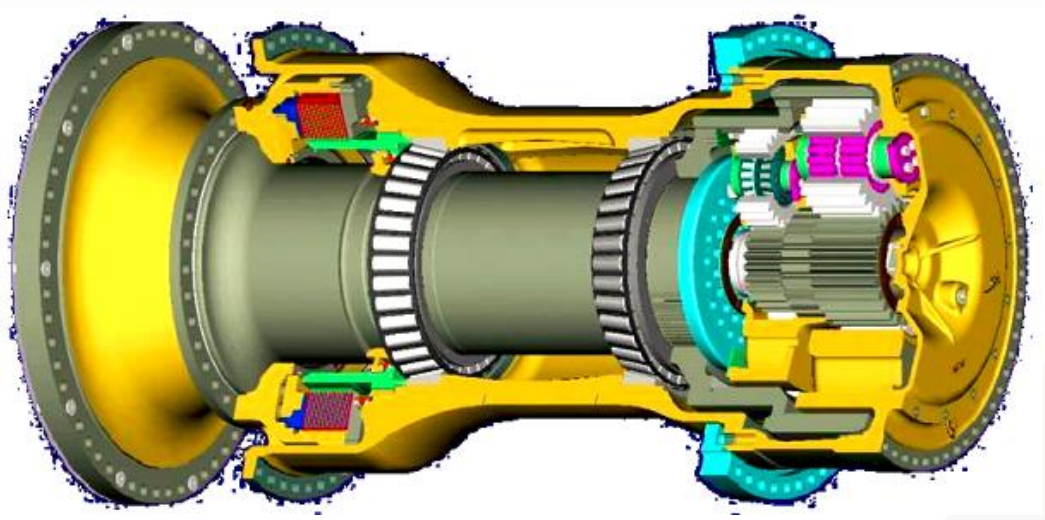


Figura 135

Mando final 797F (Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

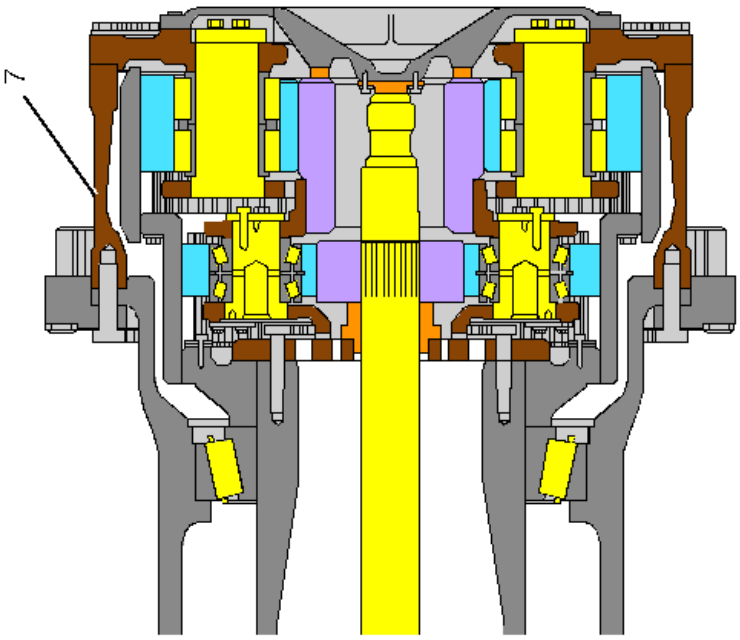


Figura 136

Mando final (Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Reducciones epicicloides

La reducción epicicloide es más pequeña y compacta que la reducción por piñón y engranaje recto. Sus piezas también se desgastan menos porque la carga se reparte uniformemente entre varios engranajes.

El empleo de las reducciones epicicloides se está generalizando cada vez más en los tractores agrícolas, máquinas industriales y camiones pesados.
La reducción puede ir junto al diferencial o sobre el extremo del mando final. Ambos tipos trabajan de la misma manera, tal como se describe a continuación.

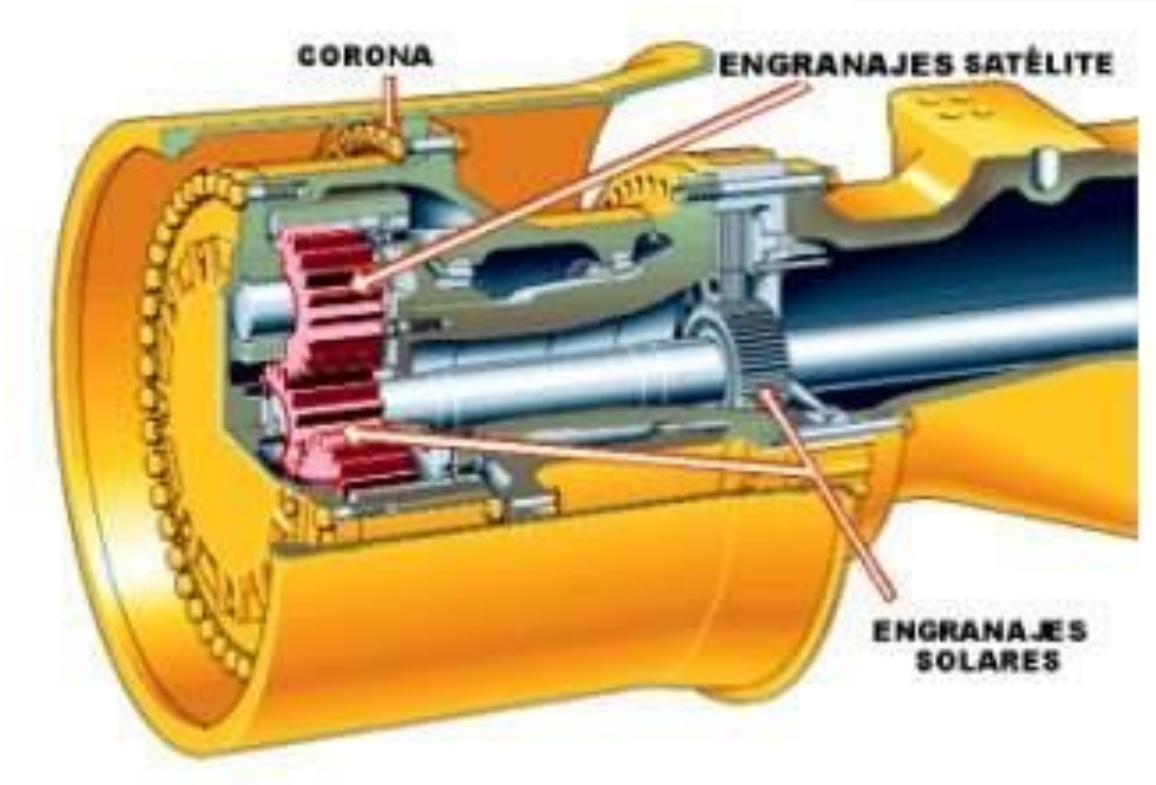


Figura 137

Funcionamiento

La fuerza se transmite a la reducción epicicloide por medio del semieje de salida conectado con el diferencial, que lleva el piñón sol. Este piñón está en toma con los planetarios, fijados por el porta-planetarios. Al girar el piñón obliga a los planetarios a rodar sobre la corona, como indican las flechas rojas. La corona es obligada a girar en el mismo sentido en que lo hace el piñón, pero a menor velocidad, con lo que se multiplica la fuerza de giro.

Reducción epicicloide junto al diferencial

Con esta disposición de la reducción epicicloide se consigue un eje motriz recto y largo que permite variar el ancho de vía de las ruedas para adaptarlo a las hileras del cultivo. Además todas los engranajes necesarios van alojados en la misma caja de la transmisión.

El palier gira sobre dos rodamientos cónicos en el interior de la trompeta y está conectado mediante estrías con el porta planetarios de la reducción. Los rodamientos van uno a cada extremo del palier.

Con este tipo de mando final, el palier soporta el peso del tractor y el empuje de la tracción, además de transmitir la fuerza de giro.

3. Modos de falla de uniones apernadas y engranajes.

Hierro y Acero

Refinado

Hierro y acero – materiales tenaces, versátiles para fabricación de equipos y productos. El hierro es muy común en nuestro planeta. Los científicos nos dicen que el núcleo de la tierra es puro hierro derretido. Y éste no solo se encuentra en el centro de la tierra. El metal de hierro forma el 5 por ciento de la superficie de nuestro planeta. Es de estos vastos depósitos alrededor del mundo, de donde el metal de hierro en bruto es extraído. Este metal es una combinación química de hierro, silicio y azufre – mezclado con alguna arcilla, arena, grava y roca.

Después que ha sido extraído, el metal de hierro es procesado en un horno de chorro de aire que mezcla el metal con caliza y una forma de carbón llamado coke. El calor y los ingredientes brutos producen una reacción química que extrae el hierro del metal. El hierro derretido es periódicamente vertido en moldes formando lingotes o pasado a otro horno para ser refinado en acero.

Algunas aplicaciones comunes del hierro fundido son para productos como culatas y bloques de motores.

El acero es utilizando en formas muy diferentes, desde gruesas placas resistentes al desgaste usadas para fabricar cucharones para cargadores, a espaciadores delgados flexibles encontrados dentro de las transmisiones.

Química

Figura 138

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Ahora veremos las semejanzas y diferencias químicas del hierro fundido y el acero. Usted aprenderá acerca de los elementos importantes encontrados en el hierro fundido y en el acero, y las diferencias distintivas entre estos elementos como son la estructura del grano y el contenido del carbón.

Semejanzas

El hierro fundido y el acero tienen varios ingredientes comunes, pero el principal es el hierro. El carbón es el elemento que más afecta la dureza y fortaleza. Otros elementos que afectan las propiedades del hierro fundido y del acero de manganeso, molibdeno, cromo y boro. El fósforo, silicio, y azufre son impurezas frecuentemente encontradas en el hierro fundido y el acero.

Estructura del metal

El hierro fundido y el acero comparten una estructura común, consistente de granos que se forman cuando el metal se solidifica durante el proceso de refinado. Los granos son cristales formados al azar que forman límites donde ellos tocan a los granos circundantes. Cualquier impureza que sea insoluble y permanezca después del refinado, será atrapada en los límites de los granos.

Diferencias

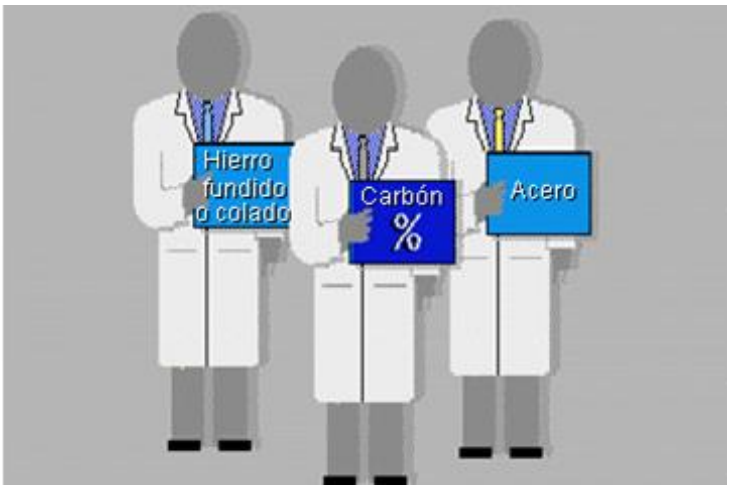


Figura 139

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

El contenido de carbón es la mayor diferencia química entre el hierro fundido y el acero. Como el hierro fundido tiene más carbón, sus propiedades son diferentes.

Contenido de carbón

Los diferentes tipos de acero tales como acero de contenido alto, medio y bajo de carbón, se obtienen al remover el carbón del hierro fundido. Si usted retira todo el carbón el resultado es hierro puro.

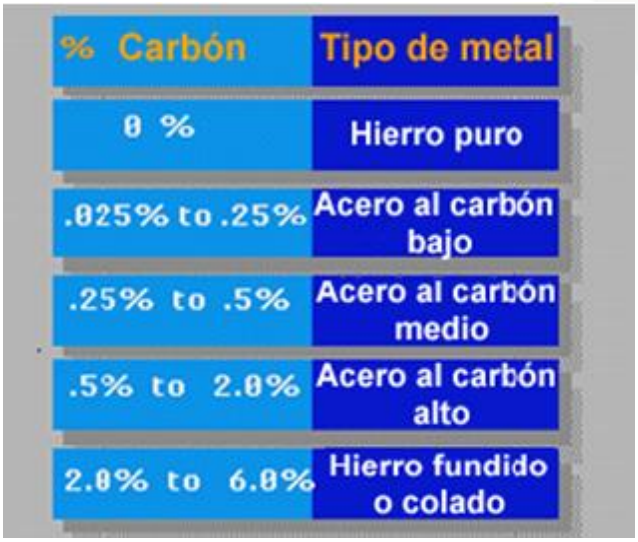


Figura 140

Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Exceso de carbón

Otra diferencia entre el hierro fundido y el acero se ve claramente bajo un microscopio. Dos por ciento de carbón es el máximo que el hierro puede disolver. El acero es hierro con menos de 2% de carbón. Si hay más carbón presente, el exceso saldrá del hierro y quedará en los límites del grano. El hierro fundido contiene más del 2% de carbón, y la estructura de su grano difiere de la del acero.

Grano del hierro fundido – Escamas de grafito

El hierro fundido tiene bolsas de grafito negro entre los granos por el alto contenido de carbón. Esto es carbón grafito – la misma sustancia de la misma de los lápices. El carbón extra da al hierro fundido características especiales como facilidad de maquinado y amortiguación de vibraciones.

Grano del acero - Sin exceso de Carbón

El acero tiene una estructura de grano que se asemeja a piedrecitas estrechamente empacadas. Debido al bajo contenido de carbón, no hay presente escamas de grafito. Esto da al acero su excelente ductilidad y maleabilidad

Clasificación del hierro fundido

El hierro fundido está clasificado en cuatro categorías basadas en la estructura del grafito.

1. Hierro gris (contiene escamas de grafito)

Figura 141

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

2. Hierro Nodular (contiene esferas de grafito)

Figura 142

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

3. Hierro Moldeable (contiene escamas de grafito)

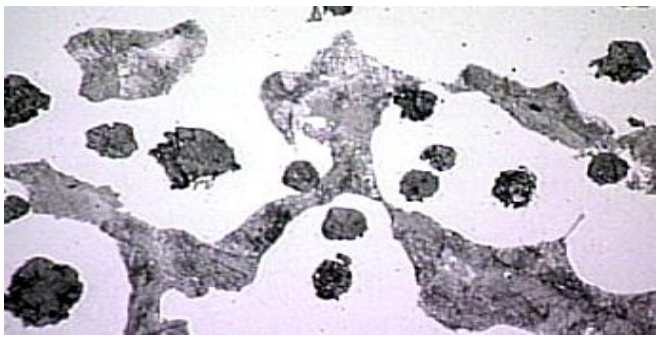


Figura 143

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

4. Hierro Blanco (contiene carburo)

Figura 144

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

lasificación del acero

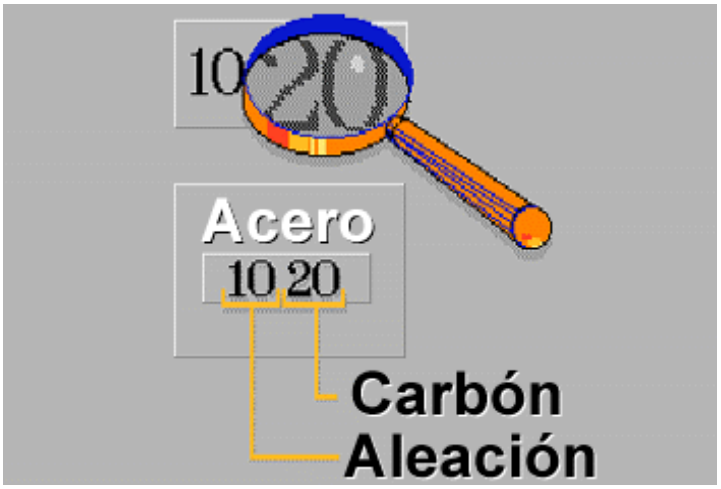


Figura 145

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

El acero contiene entre 0,025% a 2,0% de carbón. El contenido de carbón tiene un lugar en el sistema de numeración estándar del acero. Este sistema clasifica todos los tipos de acero con un código numérico. Los dos primeros dígitos son el código de contenido de aleación. El código de aleación para un acero simple en este ejemplo es 10. Los dígitos restantes muestran porcentajes de carbón. En éste ejemplo el acero tiene aproximadamente un 0,20% de contenido de carbón

Contenido de Carbón

La cantidad de carbón en el acero determina su categoría. Hay tres categorías básicas: Acero de bajo carbón, acero de medio carbón, y acero de alto carbón. Estudie la tabla para ver cómo estas categorías de acero varían en el contenido del carbón.

Dureza, Tenacidad, Ductilidad

En la ciencia de la metalurgia, la palabra “propiedades” significa las “características” del hierro fundido y del acero. Por ejemplo, dureza es una característica del acero, Tenacidad es otra. La forma como el hierro fundido y el acero son tratados determinará sus propiedades.

Dureza

La dureza es una importante propiedad, porque al cambiar la dureza del acero se afectan todas las otras propiedades, especialmente la resistencia a la indentación y al desgaste. Así al incrementar la dureza de una pieza, se incrementa su fortaleza y resistencia al desgaste. La dureza, resistencia al desgaste y fortaleza son todas incrementadas cuando el metal es tratado térmicamente.

Medición de la dureza

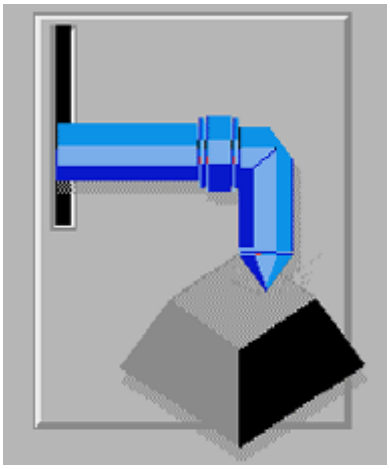


Figura 146

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

La dureza en el acero es fácilmente medible. Cuanto más difícil sea indentar el acero, mayor es su dureza. Así, para medir la dureza, usted indenta el acero usando una fuerza conocida. Si la misma fuerza de indentación es usada entonces cuanto más profunda sea la indentación más blando es el acero.

Sistema Rockwell

La profundidad de indentación medida se traduce a un número Rockwell de dureza. Materiales blandos tienen números Rockwell bajos y materiales duros tienen números Rockwell altos.

Sistema Brinell

Comúnmente se acostumbra a utilizar el sistema de clasificación Rockwell para medir la dureza del acero y el sistema de clasificación Brinell para hierro fundido. A diferencia del sistema Rockwell, el sistema Brinell mide el diámetro de la indentación.

El sistema Rockwell mide una amplia gama de materiales. Generalmente la escala más apropiada para los rangos de dureza de los aceros es la escala Rockwell C, abreviada Rc.

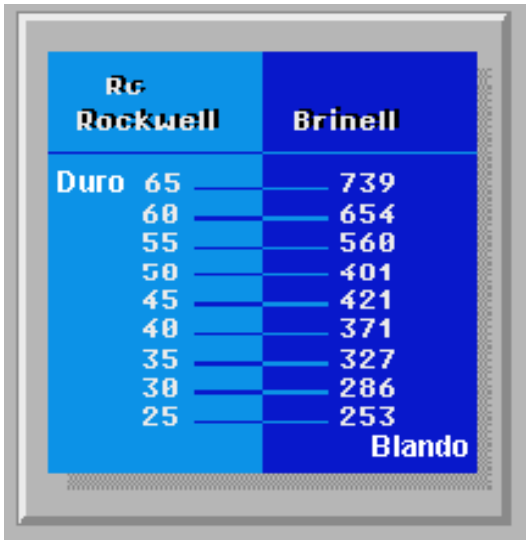


Figura 147

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Fortaleza y resistencia al desgaste

La fortaleza y resistencia al desgaste son dos de los más importantes subproductos de la dureza. Estas dos características son críticamente importantes para las cuchillas de motoniveladoras y cargadores etc.

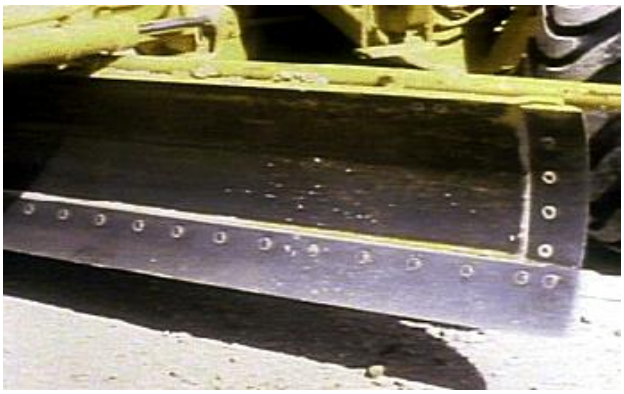


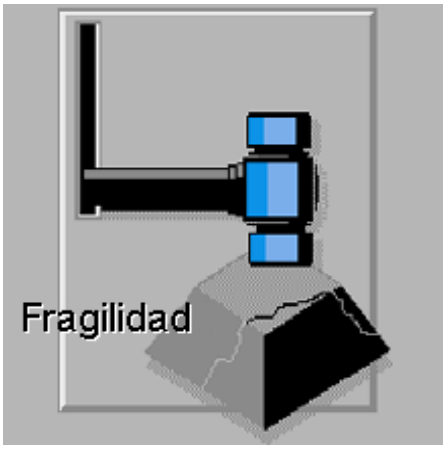
Figura 148

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Cuchillas para motoniveladoras

Hechas de acero totalmente templado, estas cuchillas son endurecidas a un mínimo de 43 Rockwell C para asegurar alta fortaleza y larga vida en condiciones de altos esfuerzos y abrasión.

Fragilidad



(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

En términos metalúrgicos, fragilidad significa que un metal se rompe o quiebra fácilmente. La fragilidad ocurre cuando una pieza de metal es muy dura. A medida que incrementa la dureza lo hace también la fragilidad. Hay una fina línea entre obtener máxima dureza sin hacer las piezas frágiles.

Tenacidad

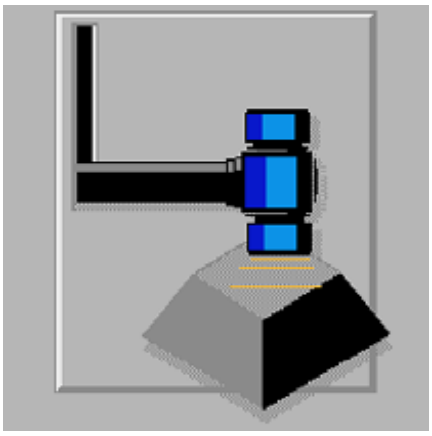


Figura 149

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Tenacidad es la capacidad que tiene el metal de absorber considerable energía antes de quebrarse. Generalmente una pieza de metal blando es tenaz hasta cierto punto. Una pieza que es muy blanda no se considera tenaz porque se deforma fácilmente.

Ductilidad

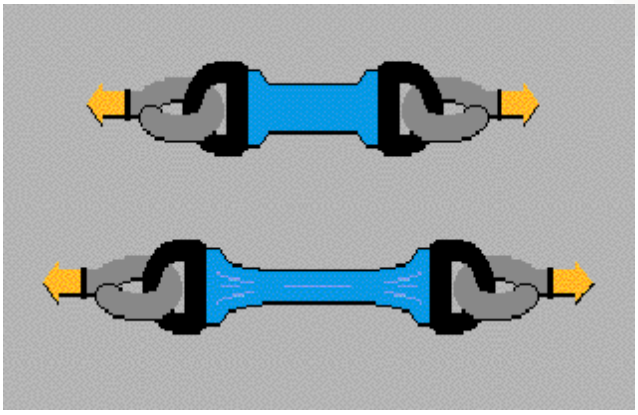


Figura 150

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Un metal dúctil puede tolerar considerable estiramiento o retorcimiento sin romperse.
Comparando ductividad y fragilidad

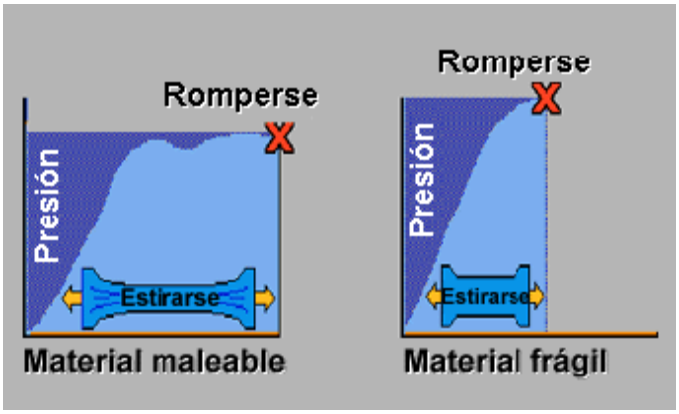


Figura 151

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

El material puede alargarse considerablemente antes de romperse como lo indica el gráfico izquierdo. El material frágil, muestra ausencia de ductilidad (derecha).

Elasticidad, tensión y resistencia a la fatiga

En este tópico usted entenderá acerca de las propiedades del hierro fundido y el acero: Resistencia elástica, resistencia a la tensión y resistencia a la fatiga.

Resistencia elástica

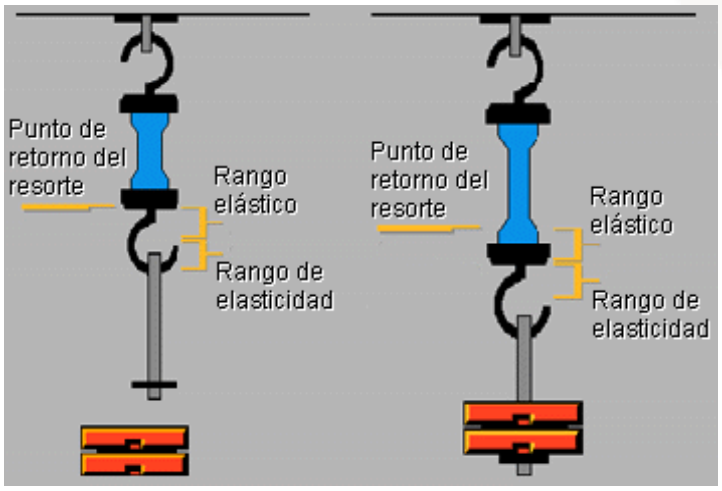


Figura 152

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Resistencia elástica es la capacidad de una pieza de metal de soportar una carga antes de deformarse permanentemente (más allá de su "punto de retorno de resorte" o rango elástico)

Varilla de Cilindro

En las máquinas hidráulicas los vástagos de los cilindros deben soportar muchas fuerzas diversas sin doblarse o deformarse más allá de su punto de retorno de resorte. Por definición esto significa que ellas deben tener gran resistencia elástica.

Medición de la resistencia elástica

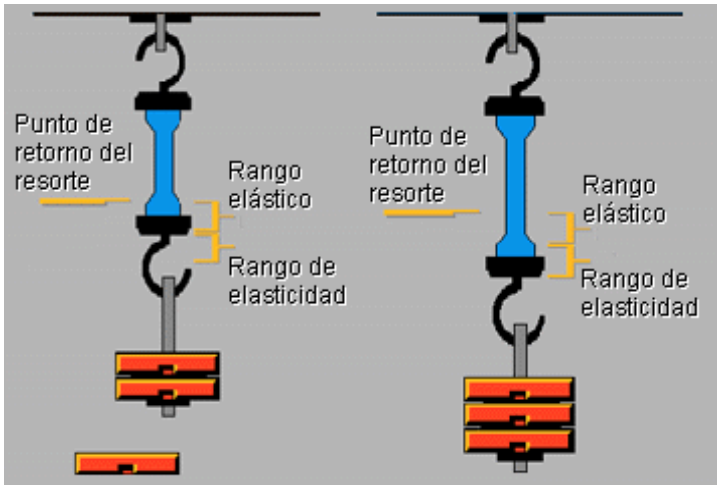


Figura 153

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

La resistencia elástica es medida en libras por pulgada cuadrada (lb/pulg2) o Mega Pascal (Mpa). Ciertas piezas deben poder soportar grandes cargas sin deformarse más allá del rango elástico o límite elástico del metal.

Resistencia a la tensión

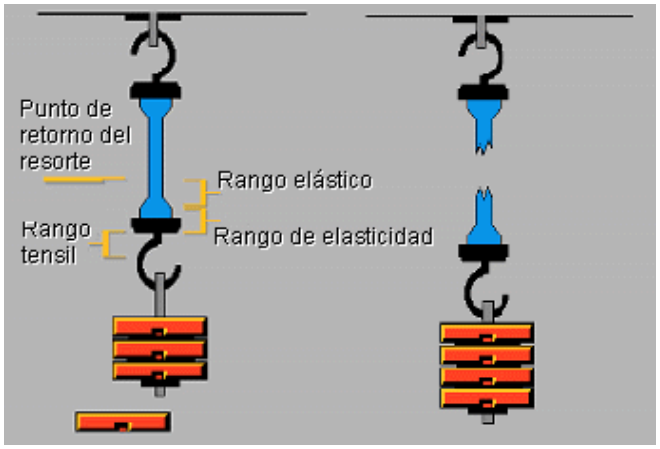


Figura 154

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Resistencia a la tensión es la capacidad de una pieza metálica para soportar cargas antes de romperse. Como la resistencia elástica, la resistencia a la tensión es expresada en lb/pulg2 o Mpa. Esto se hace para que los ingenieros puedan determinar las cargas totales en metales de diferentes formas y dimensiones.

Pernos y prisioneros

Si un perno o prisionero falla en una pieza crítica, puede resultar en una costosa reparación y tiempo muerto del equipo. Los pernos de alta resistencia (Standard) están endurecidos a 33 Rc o más y tienen una resistencia mínima a la tensión de 150.000 lb/pulg2.

Resistencia a la Fatiga

Resistencia a la fatiga es la capacidad de un metal para soportar repetidas cargas cíclicas sin romperse. La resistencia a la fatiga es aproximadamente la mitad de la resistencia a la tensión de una pieza. La prueba de fatiga es realizada principalmente para determinar el límite de fatiga de una pieza dada.

Bielas

Las bielas del motor deben soportar grandes cargas de compresión y flexión cientos de veces por minuto. Como consecuencia, la resistencia a la fatiga es una propiedad crítica de estos componentes. Las bielas son hechas de acero forjado son tratadas térmicamente para conseguir una excelente resistencia a la fatiga.

Prueba a la fatiga

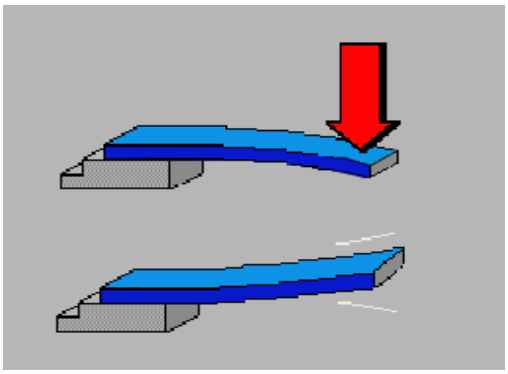


Figura 155

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Durante la prueba de fatiga, la pieza es sometida a un proceso cíclico de esfuerzo y alivio. Este ciclo se repite hasta que la pieza finalmente se rompe; luego se disminuye el esfuerzo y se repite la prueba. El valor del esfuerzo al cual la pieza ya no se rompe es llamado el límite de fatiga o resistencia a la fatiga.

Fundición

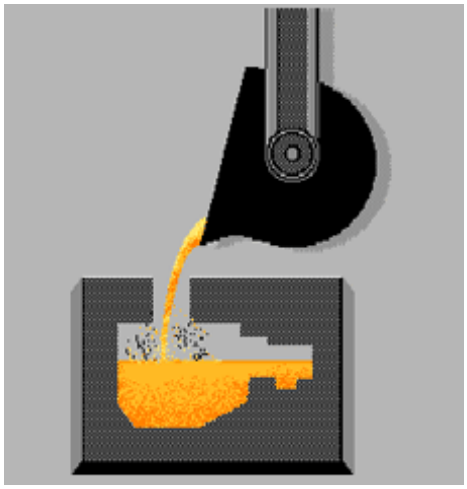


Figura 156

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Fundición es uno de los primeros pasos en el moldeado de hierro fundido y acero para la obtención de muchos productos. Fundición significa calentamiento del metal hasta un estado líquido, vaciándolo dentro de un molde y permitiéndole enfriar y endurecer a la forma deseada. La fundición puede ser luego maquinada y procesada hasta obtener el producto o la pieza final.

Proceso
El proceso de fundición para hacer un bloque de motor como éste empieza con un modelo. El modelo del bloque del motor se usa para hacer un molde para la fundición. Los bloques son fundidos en moldes de arena, hechos con una mezcla de arena, arcilla y agua. El molde de arena se usa más que cualquier otro proceso.

El hierro es fundido en grandes hornos de inducción. Después que el horno alcanza la temperatura apropiada, la escoria es removida y el hierro es colocado dentro de cucharones.

De allí, el hierro fundido es transferido a cucharones de vaciado. El hierro es luego vaciado dentro de moldes de arena y se deja en enfriamiento. Cuando el hierro endurece, el molde es desarmado, se saca la arena y se limpia la fundición. El bloque está ahora listo para el maquinado final.

Propiedades
Hierro fundido:

- Usado ampliamente y es de bajo costo
- Reduce vibración y ruido
- Es de fácil maquinado
- Resistente al desgaste

Acero fundido:

- Resistente a cargas de choque
- Más fácil de soldar que los productos de hierro fundido
- Más fuerte que el hierro fundido

Estructura del Grano
En la unidad sobre hierro y acero fundidos, usted aprendió que ambos difieren en el contenido de carbón y en la estructura del grano. El hierro fundido contiene escamas de grafito que el acero fundido no tiene. Cuando el hierro o acero fundidos se enfrían en un molde, tienen una estructura interna hecha de granos acomodados desordenadamente. Estos granos son muy parecidos a la arena compactada. La estructura del grano puede ser modificada por varios métodos de proceso y moldeado que cambian las propiedades del metal.

Metal Pulverizado

Figura 157

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

La metalurgia de metales pulverizados involucra comprimir bajo presión metal pulverizado dentro de un molde y calentarlo hasta que las partículas se fundan y lleguen a ser más densas.

La estructura del grano de metal pulverizado es similar a la del hierro fundido, excepto que no hay grafito. Los granos tienen una distribución desordenada sin flujo de grano.
Al usar diferentes polvos, pueden moldearse piezas complejas de casi cualquier combinación de agentes de aleación. Este proceso produce un rango único de propiedades tales como alta resistencia de tensión o dureza.

Procesos

Una variedad de piezas son hechas de hierro, cobre, níquel y otros metales en polvo premezclados. El polvo es primero medido dentro de una matriz. Luego se comprime como un cuerpo sólido por medio de toneladas de fuerza. El resultado es una pieza compactada de densidad uniforme. En esta etapa, las piezas de metal pulverizado no son muy fuertes.

Un proceso de sinterizado es necesario para fortalecer la pieza. Las piezas son sometidas a altas temperaturas en el horno, fundiendo y densificando los polvos. El resultado es una pieza fuerte, confiable y bien apropiada para su aplicación. Después del sinterizado, las piezas requieren muy poco maquinado, muchas veces están inmediatamente listas para el uso.

Propiedades

Las piezas de metal pulverizado tienen una variedad de propiedades dependiendo de la mezcla de polvos. Algunas piezas de metal pulverizado tienen altas resistencias a la tensión y soportan pesadas cargas.

A menudo, piezas de metal pulverizado son usadas en aplicaciones de cargas de choque bajas requiriendo alta resistencia al desgaste.

Ejemplos

Las piezas pequeñas de formas complejas por lo general son producidas por métodos de metal pulverizado. Como ejemplo tenemos componentes del sistema de inyección de combustible y de reguladores, engranajes y bridas.

- componentes del inyector de combustible
- componentes del regulador
- acoples hidráulicos de brida partida
- engranajes pequeños

Laminado

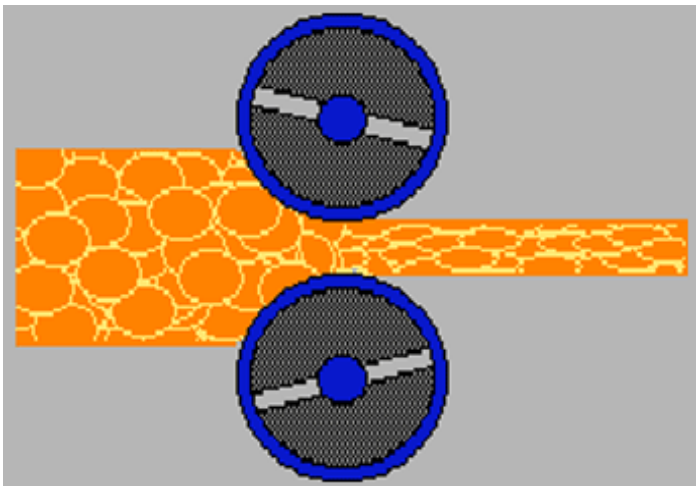


Figura 158

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

El laminado es un paso clave en el proceso comercial del acero. Este tiene dos propósitos primarios:

- Conseguir el acero en formas utilizables tales como lingotes o chapas.
- Cambiar las propiedades del acero.

Proceso

El proceso de laminar el acero comienza calentando los lingotes de metal en grandes hornos llamados “fosos de ablandamiento”. Cuando el metal alcanza una temperatura de 2200 a 2300 grados se vuelve plástico o flexible en estructura.

El lingote calentado se pasa de arriba abajo entre rodillos bajo presión muy alta. Cada pasada comprime el lingote un poco más cerca de su forma final. Las acerías producen lingotes y barras.

Cambiando la forma de los rodillos se cambia la forma del acero terminado

Propiedades

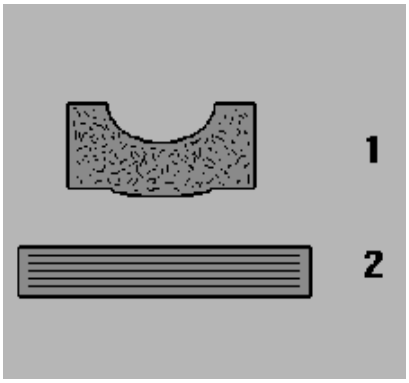


Figura 159

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

A medida que se lamina el acero de los lingotes fundidos, la estructura del grano es refinada dentro de una forma alargada y los granos son alineados en filas. Estas filas se llaman líneas de flujo, las cuales hacen el acero laminado más fuerte y más duro que el acero fundido.

- Fundición
- Laminado

Ejemplos

Muchas piezas son fabricadas de acero laminado. La mayoría de las grandes estructuras tales como bastidores, tolvas y cucharones de cargadores son fabricadas de chapas de acero laminado. Eslabones de cadenas, zapatas y otras piezas forjadas son hechos de lingotes laminados.

Forjado

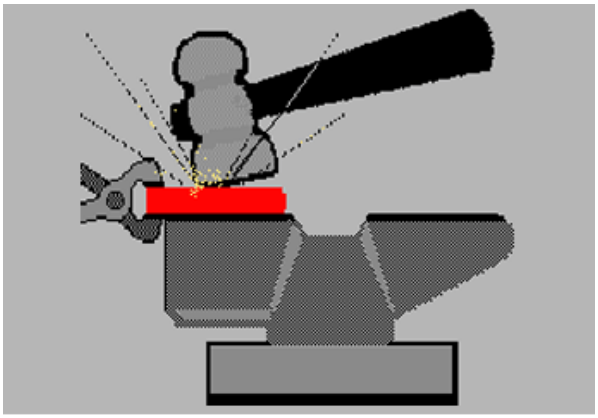


Figura 160

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

El forjado involucra calentamiento del metal hasta que esté blando y luego es martillado para darle forma a través del uso de fuerza.

Proceso

Muchas piezas de acero forjado, comienzan como un lingote de acero laminado. El lingote es primero cortado en longitudes predeterminadas o lingotes pequeños, los cuales son luego calentados hasta 2200 a 2300 grados. Estos lingotes rojo cereza salen del horno listos para la forja. Esta operación de forjado en una matriz cuádruple. Los lingotes se mueven de una matriz a otra donde son golpeados con casi 3000 toneladas de presión. Cada matriz se acerca cada vez más a la forma final.

Una vez la forja se enfría, la pieza está lista para el maquinado final y el tratamiento térmico.

Propiedades

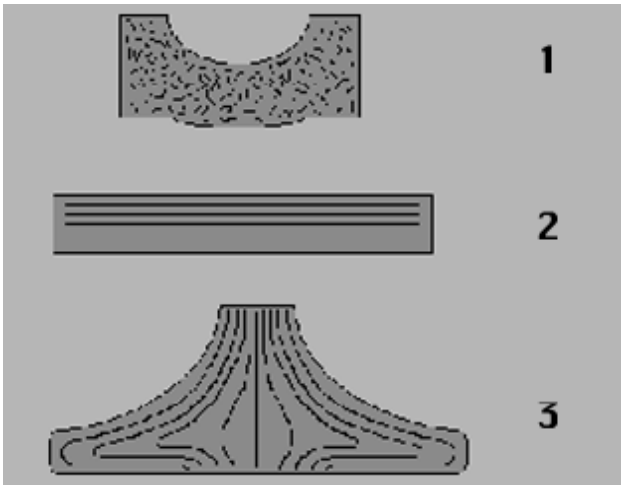


Figura 161

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Cuando se compara el acero forjado con el acero fundido y laminado se observa que el acero forjado tiene líneas de flujo que siguen el contorno de la pieza que está siendo producida. Estas líneas de flujo hacen la pieza más fuerte en la dirección del flujo y la ayudan a resistir las fisuras a lo largo de estas líneas.

- Fundición
- Laminado
- Forjado

Ejemplos

Piezas que se utilizan en aplicaciones de alto esfuerzo se fabrican frecuentemente de acero forjado. Un cigüeñal de un motor es un buen ejemplo. Debe soportar las grandes cargas que se generan dentro de un motor diésel. Otros ejemplos incluyen una biela y las herramientas de corte.

- Cigüeñal
- Biela
- Herramientas de corte

Extrusión

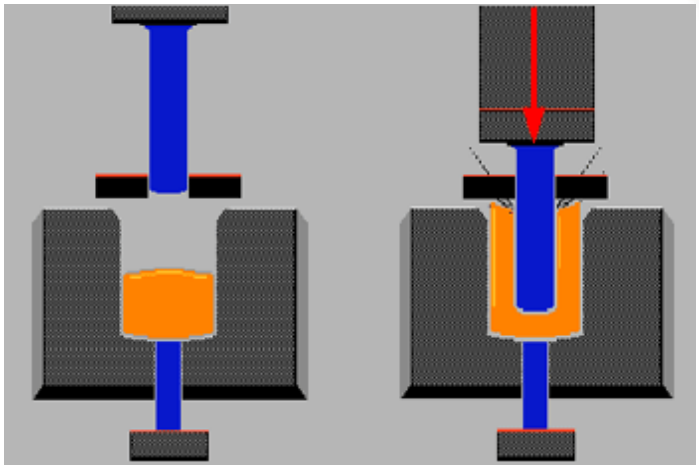


Figura 162

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

La extrusión – como el forjado - involucra el forzar un trozo de metal dentro de una forma deseada. La extrusión ocurre con metales fríos o calientes. La extrusión de las piezas se efectúa en frío a menos que sus tamaños requieran una extrusión en caliente.

Proceso

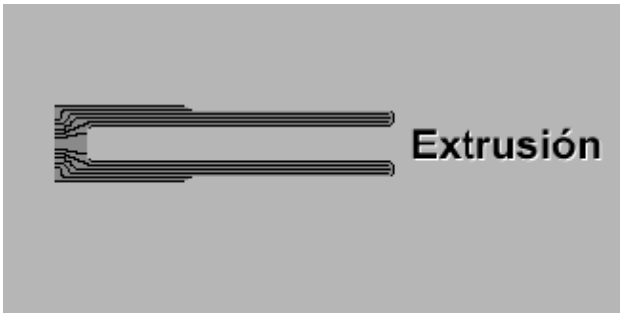


Figura 163

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

En el proceso de extrusión en frío, un trozo de acero - o lingote – es introducido dentro de un troquel por un mecanismo llamado pisón. El metal llena la matriz y luego fluye alrededor del pisón. Se necesita una presión muy alta para deformar el acero frío, así que la extrusión en frío es generalmente limitada para piezas más pequeñas tales como estos acoples de mangueras.

Las piezas más grandes son calentadas antes de la extrusión.

Esto reduce la fuerza necesaria para deformar el acero. Las piezas obtenidas por este proceso tienen superficies con un pulido excelente y pocas veces requieren de algún maquinado adicional.

Propiedades
Hay varias ventajas al usar el proceso de extrusión:

- La extrusión conserva metal, ya que el metal es desplazado en vez de ser cortado. Además la extrusión minimiza operaciones de maquinado secundario.
- Las piezas extruidas son duras. Recuerde, es la forma y uniformidad de las líneas de flujo lo que determina la dureza relativa de una pieza. Usted puede ver cómo la pieza extruida tiene líneas de flujo más finas que los otros procesos que hemos discutido.
- La extrusión produce una pieza de textura más lisa con dimensiones más uniformes.

Uniformes
La extrusión es el método preferido para la producción de muchas piezas tubulares, tales como:

- Bujes de cadena
- Acoples de manguera
- Pasadores de biela

Proceso de templado
Como una cadena, cada máquina de movimiento de tierra es tan fuerte solamente como lo sean sus componentes. Y en trabajo tan exigente como éste, no pueden existir eslabones débiles. ¿Qué hace que estas piezas sean lo suficientemente fuertes para soportar tal castigo?

¡Calor – calor extremo! Eso es lo que necesita para cambiar las propiedades físicas del hierro y del acero fundidos para convertirlos en piezas muy duras y resistentes. El horno es el primer paso de una variedad de procesos de tratamiento térmico.

El hierro y acero fundidos son tratados térmicamente de muchas maneras. El tipo de tratamiento depende de la clase de propiedades requeridas por la pieza en particular.
La mayoría de los procesos de tratamientos térmicos involucran tres pasos básicos: calentamiento, enfriamiento y revenido.

En el paso del calentamiento la temperatura es vital. Cada tipo de acero tiene una temperatura crítica a la cual se debe calentar antes de ser endurecido.
El enfriamiento por inmersión es igualmente importante. La inmersión enfría rápidamente la pieza calentada al rojo, conservando los cambios estructurales y causando el endurecimiento de la pieza. Hay varias maneras de realizar el enfriamiento dependiendo de los requisitos de la pieza.

El revenido es el paso final en el tratamiento térmico. Este es un proceso de calentar nuevamente, a una cierta temperatura, el acero previamente endurecido, permitiéndole luego enfriarse. El revenido alivia las tensiones que se produjeron dentro del metal durante el tratamiento térmico.

Metas
Existen dos metas en mente cuando se trata térmicamente una pieza:

1. hacer la superficie de una pieza tan dura que pueda resistir el desgaste por largo tiempo.

2. Endurecer la pieza hasta una cierta profundidad para mejorar la resistencia a la fatiga.

Dureza posible
El tipo de material con que se comienza determina el potencial de dureza o máxima dureza superficial; y su templabilidad o máxima profundidad de endurecimiento. Pero se tienen que aplicar el calentamiento, enfriamiento por inmersión y templado apropiados para alcanzar tal dureza superficial y profundidad de endurecimiento. Por eso se debe utilizar la combinación correcta de material y tratamiento térmico para producir las propiedades deseadas de una pieza terminada.

Dureza superficial
La dureza superficial hace exactamente lo que su nombre sugiere, produce una superficie dura en la pieza con el fin de aumentar su resistencia al desgaste.
La máxima dureza superficial depende de la cantidad de carbón en el acero. Hasta un cierto punto, contra mayor sea el contenido de carbón en el acero, mayor es el potencial de dureza de este.

Control del contenido del carbón
El contenido del carbón en el acero se controla de dos formas:

1. ajustando el contenido de carbón durante el proceso inicial de refinado del acero.

2. Añadiendo más carbón a la superficie de la pieza en un horno con una atmósfera controlada especial

Profundidad de superficie endurecida

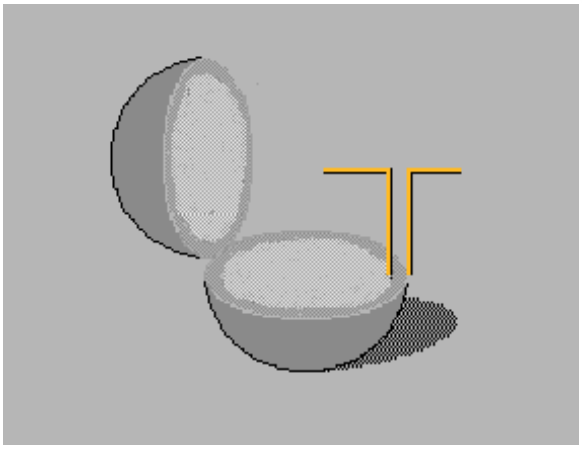


Figura 164

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Y ¿Qué es profundidad de dureza, o profundidad de superficie endurecida? La profundidad de superficie endurecida indica hasta qué profundidad la dureza penetra dentro de la pieza. La profundidad máxima de superficie endurecida depende de las clases y contenido de aleación usadas en el acero.

Contenido de aleación

El contenido de aleación en el acero se ajusta durante el proceso inicial de refinado del acero.

En resumen existen cuatro pasos importantes que son críticos para lograr las propiedades correctas necesarias para todo tipo de piezas.

Figura 165

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

1. Seleccione el material con el contenido correcto de carbón y aleación
2. seleccione el proceso térmico correcto
3. seleccione el método de enfriamiento por inmersión correcto
4. seleccione las temperaturas de revenido correctas

Calentamiento

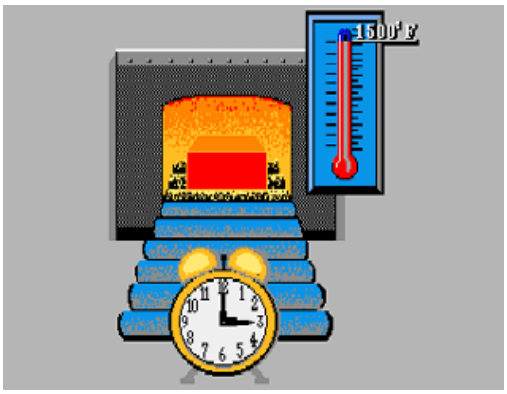


Figura 166

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

El calentamiento es el primer paso para lograr las propiedades específicas requeridas. El tratamiento térmico involucra tres pasos básicos: Calentamiento, enfriamiento y revenido. En el proceso de calentamiento la temperatura es vital. Cada tipo de acero tiene una temperatura crítica a la cual debe calentarse antes de ser endurecido. En esta sección aprenderá cómo se calientan las fundiciones de hierro y acero. Existen tres factores importantes en el proceso de calentamiento:

- Temperatura crítica mínima
- Temperatura crítica máxima
- Tiempo de calentamiento

Temperatura crítica mínima

Durante el calentamiento, comienzan a ocurrir cambios en la estructura interna de una pieza en todos los aceros al carbón (bajo, medio y alto contenido de carbón) cuando se alcanza cierta temperatura. La temperatura más baja a la cual ocurren cambios en el acero al carbón es de 1.333 grados Fahrenheit (723 grados C. La temperatura crítica mínima es importante puesto que sabemos que las piezas deben calentarse por encima de esta temperatura para producir los cambios deseados en la dureza de la pieza.

Temperatura crítica máxima

Así como hay una temperatura crítica mínima a la cual los cambios en el acero comienzan a presentarse, hay una temperatura crítica máxima por encima de la cual los cambios estructurales se completan. Generalmente, los aceros usados por Caterpillar deben calentarse por encima de 1.500 grados Fahrenheit (816 grados C), luego deben enfriarse de forma apropiada para lograr el máximo endurecimiento. Por supuesto, está temperatura crítica máxima varía dependiendo del contenido de carbón de las piezas. Durante el calentamiento debe usarse la relación correcta entre la temperatura crítica máxima y el contenido de carbón.

Tiempo de calentamiento

La tercera variable del proceso de calentamiento es el tiempo durante el cual se calienta una pieza. El tiempo de calentamiento debe seleccionarse de manera que permita que las secciones más gruesas de la pieza alcancen la temperatura deseada. Esto asegura que ocurran los cambios internos. Una buena regla práctica es permitir un tiempo de una (1) hora de calentamiento por cada pulgada de espesor.

Células cúbicas de cara centrada

El proceso de calentamiento cambia el orden de los átomos de hierro en las células unitarias. Tan pronto como el acero alcanza la temperatura crítica mínima, algunas células unitarias inician su reorganización dentro de un cubo con átomos de hierro centrados en cada cara del cubo. Esto se conoce como cubo de cara centrada, o FCC para abreviar. Si las temperaturas exceden la temperatura crítica máxima y esto se mantiene por suficiente tiempo, todas las células BCC cambian a células FCC. Las células FCC son más grandes y permiten que los átomos de carbón entren en la estructura, haciéndola más fuerte y dura.

Enfriamiento

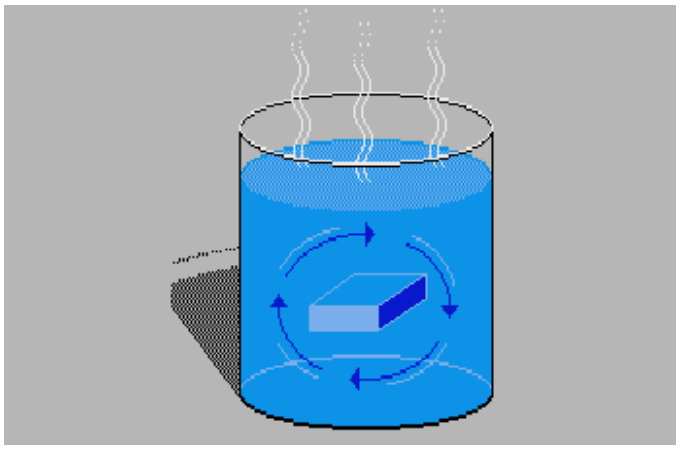


Figura 167

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Enfriar rápidamente el metal permite conseguir la dureza deseada. La mayoría de las piezas de acero al carbón se enfrían rápidamente. Esto “atrapa” la configuración del carbón a la temperatura en la estructura del grano y produce una pieza más dura. Lo importante es que los átomos de carbón permanecen atrapados, haciendo el metal más duro y más fuerte.

El enfriamiento rápido causa distorsión en el metal lo cual puede producir fracturas. El truco es enfriar lo suficientemente rápido para conservar la configuración del carbón pero minimizando la distorsión que pueda causar fracturas. Templados diferentes tienen diferentes velocidades de enfriamiento.

Agua
El enfriamiento por agua es de uso común. Es una de las formas más rápidas y más severas de enfriar metales, por lo que se deben tomar precauciones para evitar fracturas en las piezas. Los aceros al carbón puro con contenido inferior al 0,25% de carbón serán endurecidos en agua sólo parcialmente. Los aceros con contenido de carbón entre 0,30% y 0,40% se endurecen completamente en agua sin peligro de fracturas. Y los aceros con contenidos de carbón superior al 0,40% no se enfrían en agua debido a que los esfuerzos ocasionados por el abrupto cambio de temperatura pueden romper la pieza.

Como actúa el templado en agua
Las piezas enfriadas en agua se hacen de dos formas: por chorro o por baño agitado. Ambos métodos evitan la formación de una película de vapor alrededor del metal caliente, que lo aislaría del agua y demorará el proceso de enfriamiento. Durante el baño de enfriamiento, el agua es agitada y arremolinada para evitar el vapor. Esta técnica es muy efectiva, virtualmente no hay formación de vapor en estos eslabones mientras son sumergidos dentro del baño. El chorro de agua es un método aún más rápido y drástico para templar piezas. Esta técnica se usa también para el endurecimiento de un área específica.

Aceite
El enfriamiento en aceite tiene una velocidad más lenta que en agua. Los aceros al carbón puro con menos de 0,40% de carbón no responden a un enfriamiento en aceite. Los aceros entre 0,40% a 0,50% de carbón son parcialmente endurecidos en aceite. Por encima del 0,50% de carbón los aceros son totalmente endurecidos. El aceite crea menos esfuerzos en el acero que en el agua. Piezas tales como engranajes donde la distorsión es un riesgo son enfriadas por lo general en aceite.

Cómo actúa el enfriamiento en aceite
El aceite es otro de los métodos comunes de templado. Este proceso lo usamos para asegurar velocidades de enfriamiento más lentas que las que se pueden obtener con agua. Una razón para el enfriamiento en aceite es prevenir distorsiones o fracturas que pueden ocurrir si las piezas se enfrían demasiado rápido. El aceite es agitado o arremolinado con el propósito de evitar la formación de vapor alrededor del metal caliente, aislándolo del aceite. La temperatura del aceite y el tiempo que la pieza se sumerge en el baño son controlados para garantizar propiedades específicas. Se puede usar también una combinación de agua y aceite. La mezcla de agua y aceite se utiliza cuando el agua sola puede fracturar la pieza, y el aceite solo no puede enfriar la pieza lo suficientemente rápido.

Aire
El chorro de aire es el método más lento de enfriamiento, se usa comúnmente en aceros de alta aleación que pueden fracturarse si se utiliza aceite y/o agua.

Revenido
El revenido es el paso final en el tratamiento térmico de las piezas de fundición de hierro y de acero. El revenido significa calentar nuevamente las piezas endurecidas con anterioridad, por debajo de la temperatura crítica mínima, para luego permitir su enfriamiento. Nosotros calentamos de nuevo las piezas debido a la distorsión causada por los esfuerzos internos que se presentan cuando se calientan y enfrían rápidamente. La distorsión genera tensiones internas dentro de la pieza endurecida. Estas tensiones pueden causar fracturas y la pieza puede fallar prematuramente durante el servicio.

Propósito
La pieza puede ser también demasiado dura y frágil para el servicio. El revenido alivia las tensiones internas y suaviza la pieza, haciéndola más resistente. La pieza pierde algo de dureza, pero gana tenacidad. El revenido requiere calentar de nuevo la pieza a una temperatura inferior a la temperatura crítica mínima.

Como funciona
El revenido puede parecer una operación menor pero controla las propiedades finales de las piezas acabadas. Esto se logra controlando la temperatura de revenido para permitir que sólo la cantidad justa de átomos de carbón escapen de la estructura cristalina.

Calentando entre 300 a 500 grados Fahrenheit se reduce ligeramente la dureza superficial, se alivian tensiones y se restablece algo de resistencia. Calentando una pieza entre 1110 y 1200 grados Fahrenheit se reduce aún más la dureza superficial. Sin embargo, estas altas temperaturas efectúan un mejor trabajo en la liberación de tensiones y mejoran bastante la resistencia.

Métodos de producción
Endurecimiento en horno

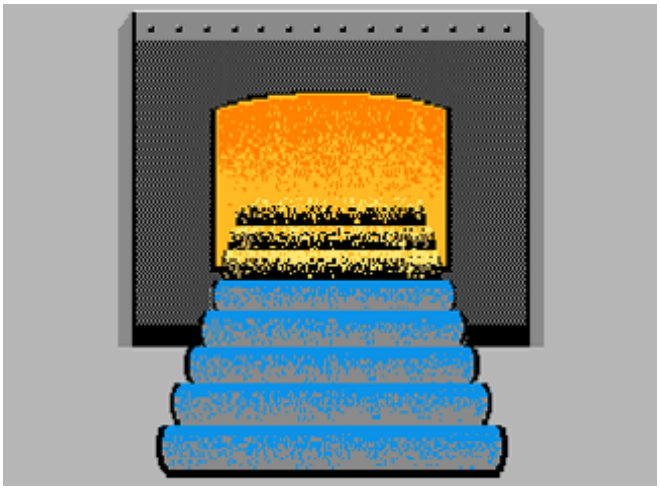


Figura 168

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

El endurecimiento en horno es una de las formas más comunes para tratar térmicamente el acero. La pieza a ser tratada térmicamente es colocada sobre una banda transportadora y conducida a través de un horno.

Proceso

Por ejemplo cuando se tratan los ejes cigüeñales estos se colocan en una banda transportadora que los mueve a través del horno de endurecimiento a una velocidad predeterminada. La banda se mueve lentamente para asegurar que las piezas se calienten por encima de la temperatura crítica máxima el punto en el cual tienen lugar los cambios deseados en la estructura interna de la pieza.

Los cigüeñales salen del horno con color naranja brillante y se templan inmediatamente en un baño de agua. Esto fija los cambios internos en el metal. Después de templados, los cigüeñales son enviados a través de un horno de revenido, luego se revisan para verificar distorsión y se envían a otros procesos.

Endurecimiento selectivo

El endurecimiento selectivo se logra usualmente mediante un calentamiento localizado y un templado completo. El objetivo es proporcionar al área seleccionada propiedades de dureza específica diferentes al resto de la pieza. Dos de las formas más comunes son el calentamiento por llama y el calentamiento por inducción.

Calentamiento por llama

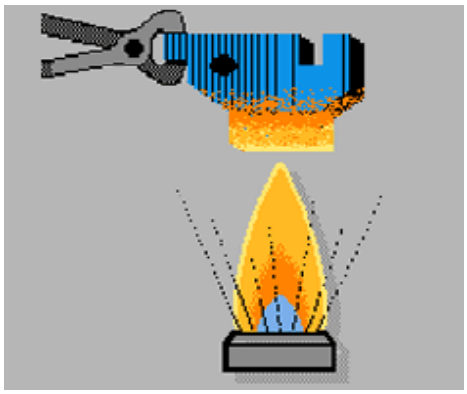


Figura 169

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

El calentamiento por llama es otro método común para endurecer únicamente un área seleccionada de una pieza. El endurecimiento selectivo significa calentar un área específica de una pieza y luego templar. El área seleccionada tendrá entonces propiedades de dureza diferentes al resto de la pieza

El calentamiento por llama se usa frecuentemente para endurecer los lóbulos de algunos árboles de levas. Esto proporciona excelente resistencia a la fatiga y resistencia al desgaste.

Calentamiento por inducción

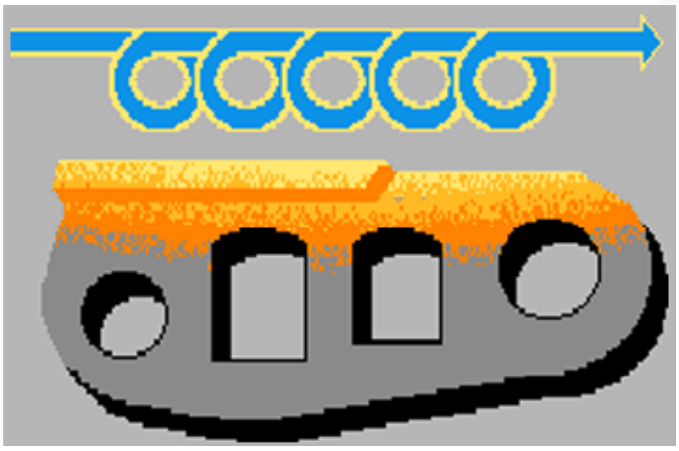


Figura 170

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

El calentamiento por inducción es una manera de endurecer un área seleccionada de una pieza. El endurecimiento selectivo significa calentar únicamente un área seleccionada de una pieza y luego templarla. Esto proporciona al área seleccionada propiedades de dureza específica para desempeñar mejor su trabajo.

El proceso de calentamiento por inducción comienza cuando la pieza a ser calentada se coloca cerca de una bobina de inducción. La corriente eléctrica en la bobina genera una corriente en el área de la pieza más cercana a la bobina. La resistencia al flujo de corriente eléctrica dentro de la pieza ocasiona su calentamiento. Una vez alcanzada la temperatura requerida y el tiempo necesario a esa temperatura, la pieza es retirada de la bobina y templada.

Endurecimiento de superficie

El endurecimiento de superficie es el proceso de endurecer sólo una delgada capa de acero en la superficie de la pieza. Esto produce mayor dureza, piezas más resistentes al desgaste con núcleos tenaces y elásticos.

Caterpillar utiliza tres procesos: carburización, carbonitruración y nitruración.

Carburización

La carburización es una forma de preparar el acero para el endurecimiento.

No es un proceso de endurecimiento. La carburización se logra colocando una pieza de acero de bajo o medio contenido de carbón en una atmósfera rica en carbón y calentándola hasta aproximadamente 1700 grados Fahrenheit o más. Después de varias horas, el carbón penetra el acero y forma una capa de material con alto contenido de carbón conocido como “capa”. Esto procedimiento incrementa la dureza potencial de la capa superficial del acero.

Como actúa la carburización

La carburización comienza tomando una pieza de acero de bajo contenido de carbón y añadiendo carbón a la superficie. Esto se logra calentando la pieza en una atmósfera controlada rica en carbón, creada mediante la entrada de gas natural dentro del horno. Los engranajes en esta operación absorben el carbón del gas. Cuanto más tiempo permanezcan dentro del horno, mayor será la cantidad de carbón absorbida, y más profunda la formación de la capa. Después de retirados del horno de carburización, los engranajes se templan de inmediato. Otras piezas son enfriadas lentamente y luego se calientan de nuevo y se templan. Esta operación produce una estructura granular más fina, la cual da a las piezas mayor resistencia a la fatiga.

La carburización produce una superficie dura y resistente al desgaste en las piezas, con un núcleo tenaz y elástico.

Las coronas deben tener un núcleo fuerte y tenaz para soportar las fuerzas de empuje generadas en el tren de fuerza de las máquinas. Pero también deben tener una superficie dura y resistente al desgaste para larga vida. Estas propiedades se logran comenzando con un acero de aleación de cromo-níquel, carburizándolo para obtener una buena profundidad de capa, calentando de nuevo y templando, y luego se efectúa el revenido.

Profundidad de la capa de las piezas carburizadas

Figura 171

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

La profundidad a la cual el carbón penetra indica la profundidad a la que el acero será reducido durante el proceso. Esto se conoce como profundidad de capa. La profundidad de capa de las piezas carburizadas varía entre 0,010 y 0,100 pulgadas, dependiendo del proceso utilizado, el tiempo de permanencia de la pieza en el horno y la cantidad de carbón en la atmósfera. Cuanta más alta sea la dureza de la superficie, mayor será la resistencia al desgaste después del endurecimiento.

Carbonitruración

La carbonitruración es otro proceso usado para preparar el acero para el endurecimiento. Una pieza es colocada en una atmósfera gaseosa a 1450 grados F aproximadamente, conteniendo carbón y nitrógeno. El carbón y el nitrógeno penetran en la superficie de la pieza. La dureza potencial de la capa superficial se incrementa por el carbón y el nitrógeno.

La carbonitruración requiere una temperatura inferior a la carburización, de esta manera la distorsión de la pieza se reduce.

Cómo actúa la carbonitruración

La carbonitruración produce una capa endurecida en las piezas calentándolas a temperaturas medias. El horno contiene una atmósfera de gas natural y gas de amoniaco. Estos gases producen carbón y nitrógeno de los cuales son absorbidos por las piezas. Es la mezcla de carbón y nitrógeno la que hace posible endurecer las piezas a una temperatura más baja, resultando en menos distorsión.

En esta operación, las piezas son calentadas durante aproximadamente cuatro horas, luego templadas dentro del horno. El resultado es una capa rica de carbón y nitrógeno que es muy dura y resistente al desgaste.

Los ejes de transmisiones y otros ejes del tren de impulsión son con frecuencia carbonitrurados para suministrarles una buena profundidad de capa a menor temperatura.

Profundidad de superficie endurecida de piezas carbonitruradas

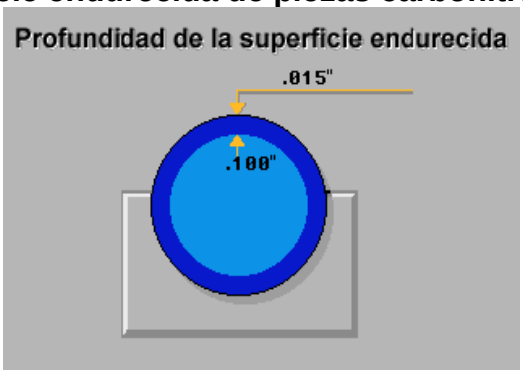


Figura 172

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

La profundidad a la cual el carbón y el nitrógeno penetran indica la profundidad de la capa endurecida después del endurecimiento. La profundidad de la capa superficial endurecida de las piezas carbonitruradas tiene una dureza de superficie particularmente alta.

Nitruración

La nitruración es una forma de endurecimiento de superficie para ciertos aceros de aleación. Es un proceso de endurecimiento que a menudo sigue el endurecimiento en horno. Las piezas se calientan a cerca de 1000 grados F, en una atmósfera de gas de amoníaco. El nitrógeno en el gas se combina con los elementos de aleación presentes en el acero para formar nitruros de aleación en la superficie. Estos nitruros de aleación son extremadamente duros y producen superficies fuertes y resistentes al desgaste sin tratamiento térmico adicional.

Cómo actúa la nitruración

La nitruración es un método importante de endurecimiento de superficie de aceros de aleación, ya que se realiza a bajas temperaturas. Y las bajas temperaturas significan baja distorsión dentro de la pieza final. Antes del proceso de nitruración, generalmente las piezas se endurecen al horno. Esto produce un núcleo endurecido. Las piezas se colocan en un horno especial tipo campana, donde se calientas a aproximadamente 1000 grados en una atmósfera controlada de gas de nitrógeno y amoníaco. Químicamente el nitrógeno se mezcla con los elementos de aleación, produciendo nitruros de aleación en el acero. La pieza es enfriada a continuación y no necesita tratamiento térmico adicional. Estos nitruros de aleación producen una pieza con una superficie muy dura; de hecho más dura que en ningún otro método de endurecimiento de superficie.

Muchos engranajes de transmisión se nitruran para crear una superficie extremadamente dura y resistente y desgaste. Las coronas se endurecen primero al horno y se templa para darle resistencia y tenacidad, luego se coloca en un horno de nitruración por varias horas. La superficie de nitruro de aleación endurecida ayuda también a prevenir picaduras y astilla duras.

Profundidad de superficie endurecida de piezas nitruradas

Figura 173

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

La profundidad de superficie endurecida de piezas nitruradas está en el rango de 0,005 hasta un máximo de 0,015 pulgadas. Cuanto mayor sea el endurecimiento, más

resistente al desgaste será la pieza después del endurecimiento. Debido a las bajas temperaturas durante la nitruración, las piezas están libres de distorsión y rara vez requieren rectificado final.

Problemas de refinado en horno de fundición

El mineral de hierro contiene algunas impurezas que no pueden removerse durante el refinado en el horno de fundición. La escoria que flota en la parte superior y que protege el metal derretido durante el refinado se puede empezar a mezclar con el metal. El ladrillo de horno que recubre los hornos de fundición puede derrumbarse y caer en el metal derretido. Estas impurezas pueden ser atrapadas durante la solidificación y se llaman inclusiones. Estas están presentes en la mayoría de los metales. El resultado final puede ser la reducción de la vida del componente.

Inclusiones

Figura 174

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Los mejores refinadores emplean procesos cuidadosamente controlados que limitan el tamaño y la distribución de inclusiones en los materiales. Sin embargo, aún los mejores cometen errores y una gran inclusión o grupo de inclusiones puede permanecer en el metal. Cuando esto ocurre una pieza puede fracturarse prematuramente exponiendo la inclusión en la superficie de la fractura.

Ojo de buey

Figura 175

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Las fracturas que comienzan en inclusiones algunas veces producen una huella distintiva, llamada ojo de buey. Esta toma su nombre de su similitud a un blanco con el ojo de buey en el centro.

Venas

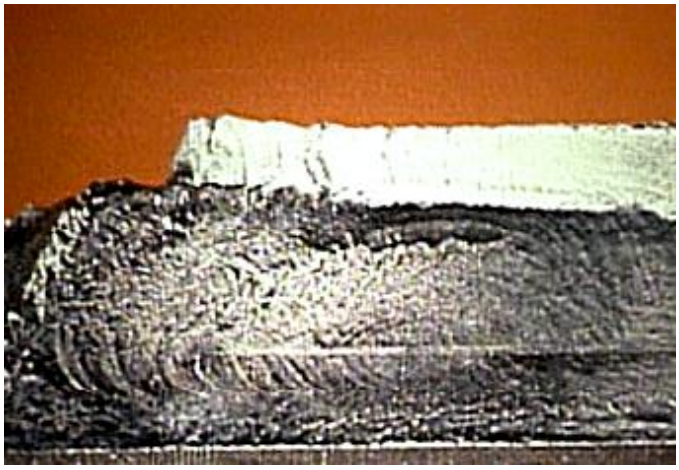


Figura 176

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Si las inclusiones se laminan, se forjan o se estiran por presión o se aplanan y alargan, se convierten en venas. Si podemos observarlas dentro del metal se asemejan a una mina de grafito dentro de un lápiz de madera. En fracturas de superficie estas inclusiones pueden ser reconocidas como líneas delgadas, rectas y planas tal como aparece en la fractura de este pasador de biela.

Problemas de fundición

Las fundiciones se producen vaciando metal líquido en un molde. A medida que el metal se enfría, puede haber una fractura como resultado de un enfriamiento demasiado rápido o demasiado lento. El metal también se contrae y se hace más pequeño. Si no se dispone de metal líquido adicional para llenar el espacio, se presentarán bolsas (vacíos) de contracción en la fundición final.

Agrietamiento

Figura 177

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Las piezas fundidas también se agrietan debido a mal manejo durante la fabricación o reparaciones en campo. Las piezas fundidas contienen escamas de grafito que las hacen frágiles y susceptibles a agrietamiento por cargas de choque repentinas. Si una camisa de cilindro tiene este tipo de grietas, la grieta puede crecer durante la combustión y resultar en una fractura.

Bolsas (Vacíos) de contracción

Figura 178

Bolsas de contracción o cavidades pueden iniciar la falla de una pieza si son suficientemente grandes. La fundición que aquí se muestra tiene un gran vacío que causó una falla prematura de la pieza.

Dendritas

Figura 179

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Una vista más cercana del vacío muestra la inusual apariencia de los granos. Esta estructura se llama dendritas y es un buen indicador de que ocurrió un problema de fundición.

Problemas de laminado, forjado, extrusión

El proceso de laminado puede producir bolsas de contracción, costura o laminas (astillas) en las piezas terminadas si la siderúrgica no controla la calidad del lingote, las temperaturas de laminado y el contenido de hidrógeno. El proceso de forjado puede producir astillas y quemaduras si las temperaturas de forjado son demasiado bajas o altas. El proceso de extrusión puede resultar en desgarres internos si el material y la temperatura no se combinan correctamente.

Bolsa de contracción

Figura 180

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Se dice que las barras de acero que contienen un orificio central tienen una “bolsa de contracción”. La bolsa es un resultado de la contracción en el lingote de acero fundido. Si no se remueve toda la contracción del lingote, el vacío se lamina y se produce un hueco plano cerca del centro de la barra

Este resorte tensor de cadena fue producido partiendo de un acero que contenía una bolsa de contracción. El área cerca del centro de la fractura muestra líneas de flujo saliendo de la fractura donde existe el hueco. Si las cargas aplicadas son suficientemente altas, o la bolsa de contracción es suficientemente grande, hay posibilidades de que se presenten fracturas como ésta.

Costura

Figura 181

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Si el metal no se mantiene a las temperaturas de laminado correctas, se puede plegar en sí mismo, produciendo una costura que tienen la apariencia visual como de una grieta corriendo a lo largo de la barra. Si estas barras se usan en otra operación de trabajo en caliente o frío, la costura se puede abrir, “reventándose”.

Escamado

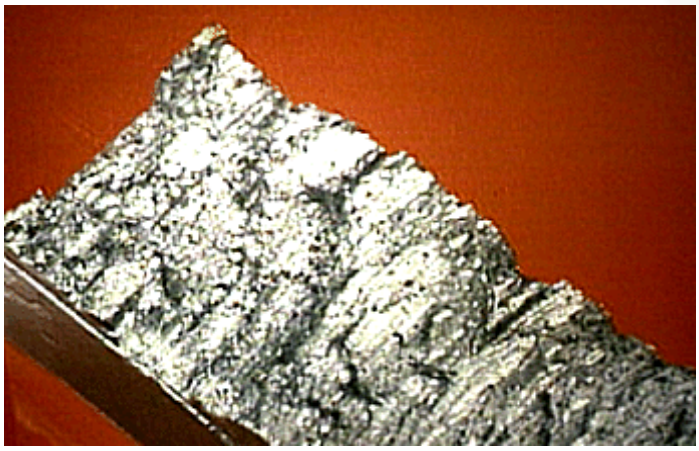


Figura 182

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

El escamado de hidrógeno ocurre en el acero cuando éste ha tenido contacto con humedad mientras está sometido a elevadas temperaturas como en los procesos de refinado, laminado, forjado, etc. El acero, a estas temperaturas, absorbe hidrógeno de la humedad. Si luego el acero es enfriado demasiado rápido, el hidrógeno permanece atrapado y puede crear una presión interna suficientemente alta para producir grietas internas diminutas. Esto es lo que se llama escamado de hidrógeno o simplemente escamado.

Solapa forjada

Figura 183

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

El forjado es similar al laminado pero tiene la ventaja de poder producir formas más complejas. Una solapa forjada ocurre cuando el metal está demasiado frío para fluir apropiadamente. El metal en la superficie de la pieza se adhiere al troquel de forjado y

se pliega sobre sí mismo en lugar de fluir. La solapa se extiende hacia abajo en la pieza y puede inducir un agrietamiento en condiciones de servicio.

Esta biela contiene una solapa forjada que causó la falla prematura del componente. Observe la mancha negra en la solapa. Este óxido negro es una buena indicación que puede usarse para identificar una solapa forjada.

Quemaduras por forja

Figura 184

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Una quemadura por forja ocurre cuando el metal está demasiado caliente para el proceso de forjado. Los granos de metal se funden en los límites del grano, usualmente cerca del centro de la pieza. A medida que la pieza se enfría, los límites permanecen separados, dejando grietas internas que pueden llegar a ser muy grandes. Si son lo suficientemente grandes, las grietas pueden extenderse bajo cargas de operación normales y causar una falla prematura. Las quemaduras por forja pueden identificarse por áreas cristalinas grandes en superficies de fracturas, usualmente cerca del centro de la pieza.

Extrusión

Figura 185

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

La extrusión o estiramiento por presión se puede hacer en caliente o en frío, y produce un flujo de grano fino a medida que se moldea la pieza. Las piezas con un diámetro mayor de una pulgada de sección transversal usualmente son extruidas en caliente, mientras que las piezas de diámetros menores se pueden extruir en frío con éxito.

Un problema que puede ocurrir durante este proceso es la ruptura interna. El metal puede gotear internamente en lugar de fluir en el troquel si las piezas no están suficientemente calientes o si son demasiado grandes para la extrusión en frío. Estas gotas pueden producir grietas cuando la pieza se coloca en servicio.

Problemas de tratamiento térmico

Un tratamiento térmico inadecuado puede resultar en una variedad de problemas, tales como agrietamiento por templado, piezas blandas y fragilidad.

Agrietamiento por templado

El agrietamiento por templado puede resultar si la templabilidad del acero es demasiado alta. La pieza desarrolla un endurecimiento de superficie que es demasiado profundo y los esfuerzos internos agrietan la pieza. Si el fluido enfriador remueve el calor demasiado rápido, causará contracciones repentinas que pueden ser suficientemente severas como para agrietar la pieza. Esto se denomina choque térmico.

Reconocimiento del agrietamiento por templado

Las grietas por templado en piezas usualmente ocurren en los cambios de contorno de la superficie se extienden internamente en la pieza. A menudo pueden reconocerse por un color azul/negro que producen las temperaturas de templado en la superficie de la fractura. Las grietas por templado pueden ser profundas o superficiales, dependiendo de cuan severas fueron las condiciones que las causaron.

Piezas blandas por temperatura excesiva
Las piezas blandas pueden ser el resultado de varios problemas de tratamiento térmico. Una de las causas más comunes es el templado a una temperatura demasiado alta. Esto causa liberación de demasiado carbón de la estructura del grano con la consecuente pérdida de dureza, fuerza y resistencia al desgaste.

Piezas blandas por templado incompleto
Otro problema común que resulta en piezas blandas es el templado incompleto. Esto sucede cuando las piezas no están totalmente inmersas en el líquido de enfriamiento, o cuando se interrumpe el flujo de fluido. El resultado final serán piezas que se desgastan excesivamente, o se deforman severamente bajo condiciones normales de operación

Fragilidad
Las piezas frágiles usualmente son el resultado de un templado a una temperatura demasiado baja. Las bajas temperaturas de templado no permiten que suficiente carbón se escape de la estructura granular y las piezas permanecen demasiado duras con mucho esfuerzo interno.

Las piezas frágiles se pueden identificar usualmente observando que experimentan fractura frágil sin causa aparente. Cuando esto ocurre, es buena idea conseguir resultados de la prueba de dureza y compararlos con los resultados de pruebas hechas con piezas reconocidas como buenas.

Problemas de maquinado
En este tópico, aprenderemos qué clase de problemas son causados por operaciones de maquinado tales como corte, rectificación y enderezado. Luego aprenderemos cómo identificar aquellos problemas cuando ocurren en las piezas.

Problemas dimensionales

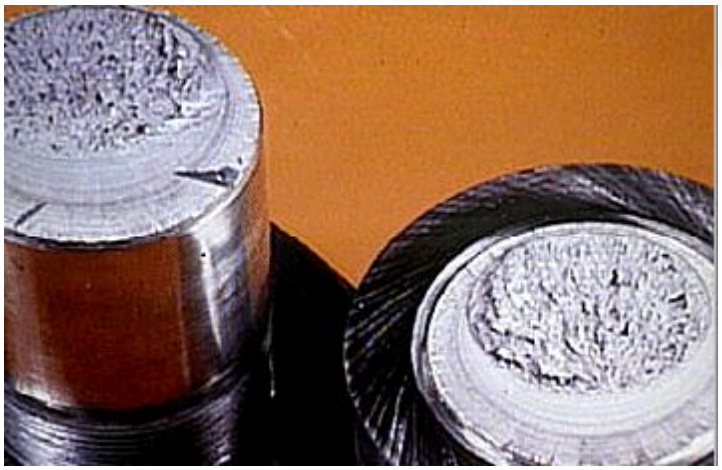


Figura 186

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Los problemas dimensionales ocurren cuando una herramienta se desafila, se utiliza una herramienta inadecuada o el montaje de la máquina es incorrecto. El resultado final puede ser dimensiones que son incorrectas. Muchos de estos problemas son descubiertos y corregidos antes que el producto sea puesto en servicio. Pero ocasionalmente, ocurren errores que al final terminan como fallas de servicio.

El plano para el vástago de este cilindro hidráulico especifica un radio de 0,120 pulgadas. El proceso produjo uno de radio 0,036 pulgadas. El resultado fue un cambio de perímetro abrupto que resultó en una falla prematura. Estos problemas usualmente pueden detectarse midiendo piezas o comparando piezas que han fallado con piezas reconocidas como buenas.

Problemas de rectificado

Los problemas de rectificado deben ser cuidadosamente controlados para prevenir problemas. Si el flujo de refrigerante se interrumpe o se desvía, se remueve demasiado metal con demasiada rapidez, o la rueda rectificadora se atasca o necesita afilado. El resultado final puede ser excesivo calor.

Este calor puede ser suficientemente severo para producir un calentamiento local y una operación de templado, produciendo calcinamientos o grietas de superficie. Los calcinamientos usualmente se pueden reconocer por su apariencia de color marrón o negro, mientras que las grietas se pueden encontrar con pruebas de partículas magnéticas.

Enderezado

El enderezado es un proceso utilizado frecuentemente en tratamientos térmicos de piezas, con el fin de eliminar la distorsión que ocurre durante el templado. El proceso

consiste en aplicar presión mecánica o hidráulica para doblar la pieza en la dirección que elimine la distorsión

Grietas por excesivo enderezamiento
Si se dobla demasiado, la pieza puede agrietarse. Este cigüeñal fue enderezado demasiado y desarrolló la fisura de textura áspera que se ve en la parte superior.

Esfuerzo en los materiales
Aprendimos en la sección anterior los diferentes tipos de carga a que están sometidas las piezas. Las cargas generan esfuerzos en el interior de las piezas. El tipo de carga determina el tipo de esfuerzo que resulta.

Esfuerzos de tracción
Las cargas de tracción son fuerzas que tienden a tirar de un objeto separándolo, resultando en esfuerzos de tensión internos que resisten estas fuerzas de separación y mantienen la pieza unida. A medida que las cargas aplicadas se incrementan, los esfuerzos internos se incrementan también. Las líneas de esfuerzo debidas a las cargas de tensión tratan de distribuirse uniformemente sobre la sección transversal de la pieza. De hecho la definición matemática de esfuerzo es igual a la fuerza dividida por el área de la sección transversal.

Esfuerzos de compresión
Las cargas de compresión generan esfuerzos de compresión internos que hacen que la pieza se resista a ser comprimida. Los esfuerzos de compresión se distribuyen uniformemente sobre la sección transversal del mismo modo que los esfuerzos de tensión.

Esfuerzos de flexión
Las cargas de flexión generan esfuerzos de comprensión en el lado cóncavo y esfuerzos de tensión en el lado convexo. El centro del objeto experimenta muy poco o casi nada de esfuerzo. Las líneas de esfuerzo de flexión no se distribuyen uniformemente sobre la sección transversal del objeto, sino que son más altas en la superficie y van disminuyendo hacia el centro. Generalmente, la fractura comienza en el lado convexo, donde se presentan los esfuerzos de tensión.

Esfuerzos de torsión
Las cargas de torsión resultan en líneas de esfuerzo de tensión que van en espiral a lo largo de la longitud del objeto. Las fracturas generalmente, comienzan en estas áreas de esfuerzo de tensión. Los esfuerzos de tensión debidos a cargas de torsión son más altos en la superficie del objeto y disminuyen hacia el centro.

Cargas de torsión producen esfuerzos de corte
Además de los esfuerzos de tensión, las cargas de torsión producen esfuerzos de corte a lo largo de la longitud de la pieza a través de su sección transversal. Estos se llaman esfuerzos de corte transversal y longitudinal.

Esfuerzo de corte longitudinales
Los esfuerzos de corte longitudinales se pueden ilustrar mediante una manguera que se corta longitudinalmente. Girando la manguera en la dirección mostrada por las flechas produce esfuerzos de corte longitudinales mostrados por el movimiento relativo de las líneas blancas. Estos esfuerzos pueden causar la fractura de la pieza a lo largo de su longitud.

Esfuerzos de corte transversales
Los esfuerzos de corte transversales se pueden ilustrar usando un resorte con una línea de referencia pintada en toda su longitud. Cada espiral del resorte representa una sección de corte transversal de la pieza.

A medida que se aplican las cargas de torsión, cada sección de corte gira un poco en relación a las secciones vecinas. Esto causa que la línea blanca gire en espiral a lo largo de la longitud del resorte mostrando los esfuerzos de corte transversales. Estos esfuerzos pueden causar que las piezas se fracturen a través de su sección de corte.

Esfuerzos de corte
Las cargas de corte...fuerzas que tratan de empujar un objeto en direcciones opuestas...resultan en líneas de esfuerzo de corte paralelas a las cargas. Los esfuerzos de corte son más altos en el área cargada y disminuyen con la distancia. Como los esfuerzos de tensión, los esfuerzos de corte son generalmente responsables del inicio de las fracturas.

Concentradores de esfuerzo
Un elevador de esfuerzo, también llamado concentrador de esfuerzo, es una condición física sobre o dentro de una pieza cuyo resultado es mover las líneas de esfuerzo, uniéndolas en algún punto sobre o dentro de la pieza. Esta concentración de las líneas de esfuerzo resulta en un esfuerzo localizado y más alto, en el concentrador de esfuerzo.

Efecto del concentrador de esfuerzo
Las cargas de flexión empujan un objeto alejándolo de sus extremos establecidos.
Se forman esfuerzos de tensión en el lado convexo y esfuerzos de comprensión en el lado cóncavo.

Los esfuerzos son más altos sobre la superficie de los objetos y disminuyen hacia su centro.
Defectos del material
Los concentradores de esfuerzo relacionados con material, especialmente en el acero, generalmente son “inclusiones”. Las inclusiones son impurezas que se mantienen en el metal después que el proceso de refinamiento se ha completado. Las inclusiones pueden ser contaminantes del mineral, piezas del revestimiento del horno o partículas de escoria atrapadas en el acero.
Inclusiones
Las inclusiones pueden tener una variedad de formas. Algunas son solo agrupaciones irregulares de contaminantes. Otros son casi esféricos. Si la fractura comienza en una

inclusión de forma esférica se produce una fractura con apariencia de blanco llamado ojo de buey.

Otras inclusiones son largas y delgadas. Estas son llamadas venas. La fractura que es perpendicular a una vena producirá un ojo de buey. Las fracturas que comienzan a lo largo de una vena tienen este aspecto.

Errores de fabricación
Los procesos de fabricación tales como fundición, laminado, forjado, tratamiento térmico y rectificado pueden introducir bolsas de contracción y fracturas dentro del metal.

Errores de fundición
Si no se dispone de suficiente metal para llenar las áreas de contracción a medida que se enfría el metal y comienza a solidificarse, o si el diseño del molde es incorrecto, las fundiciones pueden contener vacíos, llamados cavidades o bolsas de contracción. Algunas veces las cavidades o bolsas de contracción. Algunas veces las cavidades de contracción pueden reconocerse por los granos largos y en forma de aguja que se llaman dendritas y que se forman en las cavidades.

Errores de forjado y laminado
Este tornillo tiene una costura causada por material plegándose sobre sí mismo durante el laminado en caliente. La costura parece una fractura a todo lo largo del tornillo. Este ojo de biela tiene una solapa de forja causada por material que se solapó o plegó sobre sí mismo en el troquel de forja. La solapa de forja contiene una escama oscura producida por la alta temperatura de forjado.

Errores de tratamiento térmico
Las fracturas por tratamiento térmico pueden producirse por enfriamiento rápido de material, o por no templar las piezas que lo necesitan, inmediatamente después del enfriado por inmersión. Esta biela desarrolló una grieta en el extremo del buje durante el enfriamiento. Algunas grietas de enfriamiento desarrollan una mancha oscura entre azul y negro debido al templado. Si el tratamiento térmico causa que las piezas se deformen, tendrán que enderezarse mecánicamente. Esta operación podrá producir fracturas de enderezamiento como la de este cigüeñal.

Errores de maquinado
Flujo de refrigerante interrumpido, refrigerante no dirigido hacia el punto de contacto de la rueda y cortar demasiado, puede resultar en quemado o fracturas por rectificado. Algunas veces el quemado por rectificado deja manchas irregulares de color marrón sobre la superficie del metal. Las fracturas por rectificado generalmente resultan en fracturas muy finas que son difíciles de ver.

Contornos de diseño
Algunas veces es necesario diseñar cambios de contorno abruptos tales como ranuras de anillos de resorte, resaltos, pequeños filetes y agujeros. Los diseñadores planifican estos cambios de contorno y especifican materiales más fuertes o tratamientos térmicos

para dar a la pieza en estos puntos la resistencia adecua. Aun así, los cambios de contorno continúan siendo concentradores de esfuerzo que pueden iniciar fracturas

Ejemplos de cambios de contorno
El resalto en esta pieza es un cambio de contorno que resulta en un concentrador de esfuerzo.

El endentado en esta pieza es otro tipo de cambio de contorno que resulta en un concentrador de esfuerzo.

Daños de superficie
Las muescas o hendiduras en las piezas son cambios de contorno accidentales que no deberían estar presentes.

Generalmente son causados por la manipulación de las piezas durante el armado o la reparación del producto. Si el daño de la superficie es bastante severo u ocurre en un área altamente cargada de la pieza, podrá fracturarse.

Resultado de los daños de superficie
La muesca en esta pieza creó un cambio de contorno de la superficie que inicio una fractura.

Fracturas
Sobrecargas
Frecuentemente las piezas se fracturan debido a que la carga aplicada es mayor que la que puede soportar la pieza.

Hay dos tipos de fracturas que pueden resultar de sobrecargas, fracturas dúctiles o frágiles y fracturas por fatiga.

Fractura dúctil o frágil
Con sobrecargas o cargas de impacto severas, a menudo pueden ocurrir fracturas durante la aplicación de una sola carga. Estas fracturas son llamadas fracturas dúctiles o frágiles

Fracturas por fatiga
Las sobrecargas cíclicas son cargas que ocurren repentinamente durante un período de tiempo. Una carga por sí misma no es suficiente para causar una fractura, pero el efecto de repetidos ciclos de carga puede causar una fractura por fatiga.

Prueba del límite de fatiga

Se pueden hacer pruebas para determinar la cantidad de carga y el número de ciclos que una pieza puede soportar sin fracturarse. Esto se conoce como prueba del límite de fatiga.

Resultados de la prueba

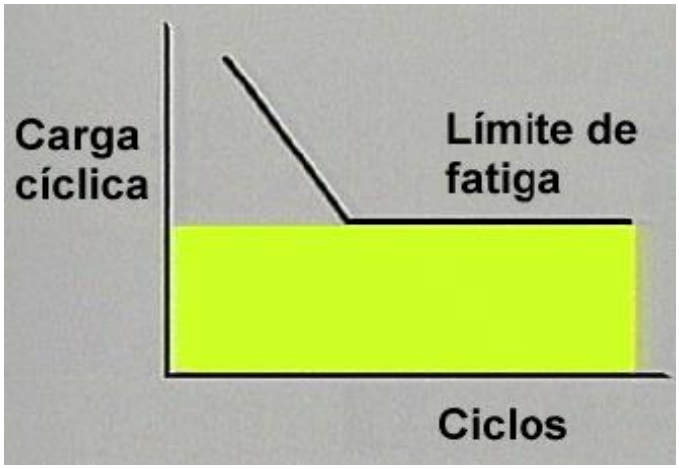


Figura 187

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Los resultados típicos de una prueba de fatiga pueden ser como éste. El eje vertical muestra la cantidad de carga y el eje horizontal muestra la vida de la pieza en número de ciclos aplicados. El límite de fatiga muestra la máxima carga cíclica que una pieza puede soportar. Si la carga cíclica se mantiene por debajo del límite de fatiga, no deberá ocurrir fractura.

Factor de seguridad de diseño

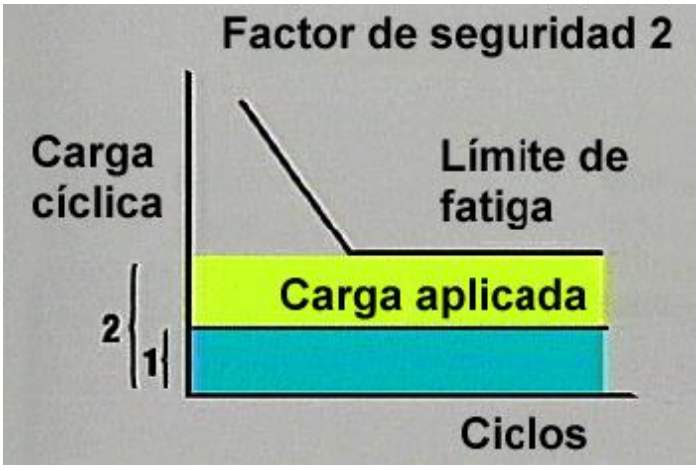


Figura 188

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Las condiciones de trabajo varían. Por eso el límite de fatiga deberá estar por encima de las cargas aplicadas. La comparación entre el límite de fatiga y la carga aplicada se

llama factor de seguridad de diseño. Si el límite de fatiga es el doble de la carga aplicada el factor de seguridad es de dos.

Características de fracturas
Es importante ser capaz de clasificar las fracturas a fin de determinar qué las causó. Podemos identificar la mayoría de las fracturas mediamente observaciones cuidadosas de la textura, color, reflectividad y características particulares de la superficie.

Textura
La textura o “aspereza” de una fractura será determinada por la velocidad de propagación de la fractura. Aquellas fracturas que se propagan más rápidamente, presentas superficies “ásperas”; fracturas con velocidad de propagación más lenta, presentan una superficie más suave.

Color
Las fracturas en la superficie varían en color, de plata a negro oscuro. Este color puede ayudar a identificar la fractura.

Reflectividad
La reflectividad ayuda a identificar las fracturas, pues algunas fracturas reflejan la luz mejor que otras. Las fracturas frágiles algunas veces brillan, mientras fracturas dúctiles rara vez reflejan.

Características de la superficie
Las fracturas en materiales blandos desarrollan más características de superficie identificadoras que las fracturas en metales más duros.

Granos
Las piezas metálicas están hechas de granos. Es útil comparar la estructura granular a una pared hecha de piedras sujetas con mortero. Podemos considerar los granos metálicos como las piedras y los espacios entre los granos como las uniones de mortero. Cuando las piezas se fracturan, los granos se rompen de modos muy específicos. Hay tres tipos básicos de fracturas: frágil, dúctil y por fatiga.

Frágil

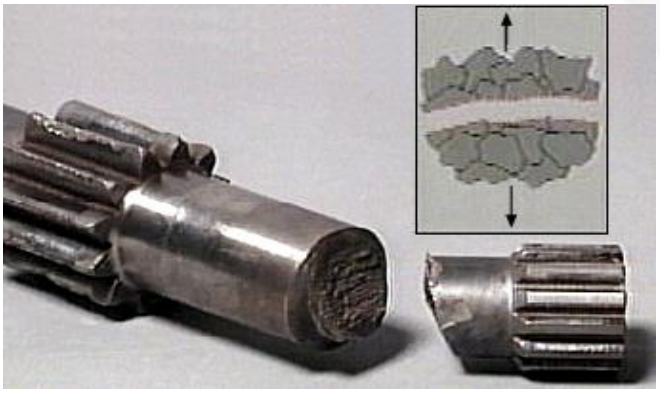


Figura 189

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

En una fractura frágil los granos se rompen o la fractura se propaga a lo largo de los límites. La forma del grano realmente no cambia.

Dúctil

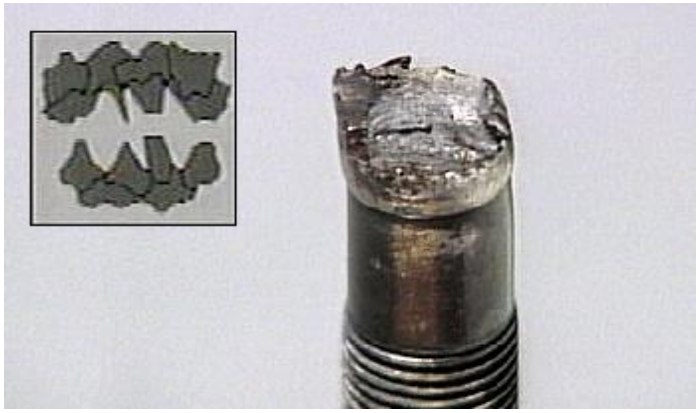


Figura 190

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Los granos en una forma dúctil son torcidos y estirados antes de romperse. Su forma, y la forma de la pieza, cambian significativamente.

Fatiga

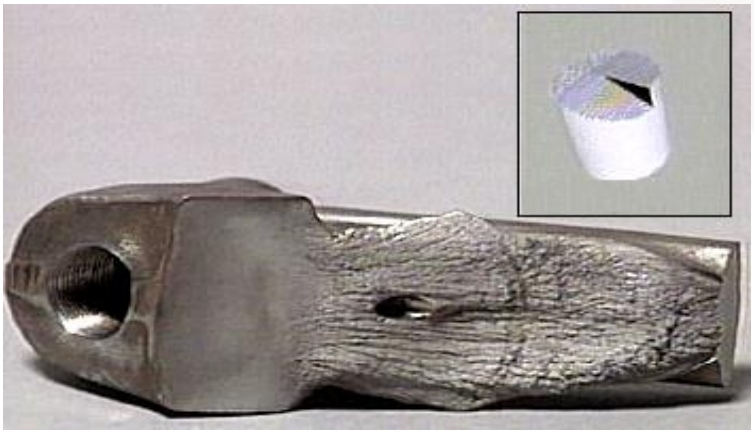


Figura 191

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

En una fractura por fatiga los granos se rompen lentamente. Las fracturas pueden también ocurrir alrededor de los granos.
Hay poco cambio en la forma.

Fractura frágil

Las fracturas frágiles son generalmente el resultado de una carga de impacto súbita. La fractura ocurre de repente y con poca deformación plástica – esto es, la pieza no cambia de forma. Si los pedazos se volvieran a juntar, parecería como si la pieza no hubiera sufrido mucho daño. Las fracturas frágiles se pueden dividir en dos tipos: clivaje e intergranular. Las fracturas por clivaje son llamadas también transgranulares.

Clivaje

Las fracturas por clivaje tienden a separar los granos dejando superficies planas. Esto sería similar a romper las piedras de una pared de piedra. Las fracturas por clivaje generalmente tienen una textura áspera con una coloración medio grisácea. En materiales duros, la superficie puede brillar como si tuviera diamantes. Este efecto es producido por el reflejo de la luz en las superficies planas de los granos fracturados. Esta fractura de la cabeza de válvula tiene una textura áspera, color gris y no tiene prácticamente ninguna deformación plástica. También brilla cuando se cambia el ángulo de iluminación. Todas son características de fractura por clivaje.

En materiales más blandos, puede desarrollarse una característica de superficie llamada chevrón o sardineta. Estos son pequeños lomos y hendiduras en la fractura que generalmente se propagan a medida que la fractura crece. Esta fractura de diente de engranaje tiene una textura muy áspera, color gris y chevrones. Todas las características de una fractura por clivaje.

Causa de fractura por clivaje
Cuando una fractura contiene una o más de las características de fractura por clivaje, tales como poco o ningún cambio de forma, superficie de la fractura brillante o chevrones, es muy posible que la fractura haya sido causada por un simple golpe o carga de impacto repentino. Esta información puede ser muy útil para determinar por qué ocurrió la fractura.

Intergranular
Las fracturas frágiles intergranulares tienden a romper el enlace entre los granos, exponiendo las superficies de forma irregular de los granos. Esto es similar a romper las uniones de mortero en una pared de piedra.

Características intergranulares
Las fracturas intergranulares poseen la mayoría de las características de las fracturas por clivaje. La diferencia principal es que las fracturas intergranulares no brillan tanto como las fracturas por clivaje.

Ejemplo de intergranular

Figura 192

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Mirando cuidadosamente este tornillo fracturado, vemos una superficie áspera, color gris, no hay deformación plástica y casi no brilla. Estas son todas las características de fracturas intergranulares.

Causa de fracturas intergranulares
Cuando una fractura frágil muestra características de clivaje pero no brilla o lo hace muy poco, examine la fractura con una lupa para ver si hay superficies granulares ásperas visibles, identificando esto como una fractura intergranular. Es importante reconocer fracturas intergranulares debido a que ellas pueden ser causadas por una combinación de cargas, ambiente de trabajo y materiales o procesos que no son compatibles entre sí. Es estos casos puede requerirse un análisis más profundo de técnicos metalúrgicos o ingenieros para descubrir la razón de la fractura.

Fracturas dúctiles
Las fracturas dúctiles ocurren más lentamente que las fracturas frágiles y generalmente son el resultado de una simple sobrecarga. Como consecuencia, los granos del metal tienden a estirarse o cambiar de forma antes de desprenderse.

Deformación plástica y labio de corte
La superficie áspera producida al separarse los granos tiende a dispersar la luz en vez de reflejarla. Como consecuencia, las fracturas dúctiles a menudo tienen un color oscuro. La característica más importante de identificación es la deformación plástica o cambio permanente de la forma. Esta deformación puede ser estrechamiento, dobladura, estiramiento o torcedura dependiendo del tipo de carga. Al juntar las piezas metálicas de nuevo, revelarían un cambio de forma permanente. Esto se llama deformación plástica.

Otra característica importante de identificación es el labio de corte. La mayoría de las fracturas dúctiles comienzan por dentro, donde los granos del metal comienzan a separarse de las inclusiones creando vacíos dentro de la pieza. Al continuar la carga los granos se desprenden y los vacíos internos se expanden hasta que la única parte del metal que no se ha fracturado está alrededor del borde externo de la pieza. Pero, pronto este metal se sobrecarga y se cizalla produciendo un labio de corte.

Cargas por tracción

Figura 193

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Las fracturas dúctiles causadas por sobrecargas por tracción producen en el material una apariencia áspera, gris oscura o negra, con estrechamiento y un labio de corte en casi toda el área alrededor de la circunferencia. Este perno de culata, es un ejemplo de fractura dúctil causada por una sobrecarga por tensión. Note la textura áspera, color gris oscuro, falta de reflexión y el labio de corte.

Cargas por flexión

Figura 194

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Cuando una pieza se somete a una sobrecarga por flexión, la fractura dúctil produce superficies ásperas de color gris oscuro. El labio de corte generalmente aparece en el lado de compresión de la fractura y es la última sección de metal que se desprende

Cargas de corte

No todas las fracturas dúctiles tienen superficies ásperas. En condiciones de carga de corte, las piezas se fracturan por deslizamiento de unas con otras. Esto produce una textura bastante suave, mejor descrita como “satinada” o “suave y sedosa”.

Cargas torsionales

Las fracturas dúctiles producidas por cargas torsionales pueden ocurrir ya sea en el plano de corte transversal o longitudinal. Si la fractura ocurre a través de la pieza, es llamada de corte transversal. La mayoría de la superficie de la fractura es suave y sedosa. En la fractura final, la superficie es áspera y gris oscura. La fractura ocurre longitudinalmente a la pieza, es llamada de corte longitudinal. El flujo de grano puede exponerse produciendo una superficie gris leñosa.

Fracturas por fatiga

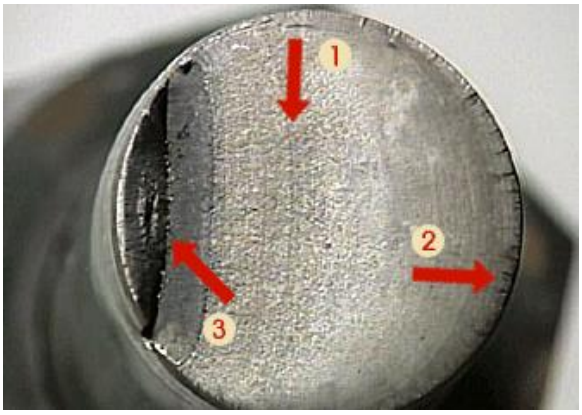


Figura 195

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Las fracturas por fatiga ocurren después de muchas cargas repetidas. Hay dos categorías de fracturas por fatiga: de alto ciclo y de bajo ciclo.

Alto ciclo

Las fracturas por fatiga de alto ciclo ocurren después de cientos de miles o millones de aplicaciones de carga. Durante la fatiga una minúscula fisura comienza en un punto, quizá una inclusión o algún otro concentrador de esfuerzo, y va creciendo con cada ciclo. A medida que la grieta crece, su velocidad aumenta. En un cierto punto, el área restante no agrietada se sobrecarga produciéndose una fractura frágil o dúctil. A esto se llama fractura final.

Puesto que la fractura de alto ciclo ocurre muy lentamente, la textura de la superficie es muy suave. El color del acero es gris plata claro ya que la fractura es lo suficientemente lisa para producir reflejo.

Bajo ciclo

La fatiga de bajo ciclo ocurre mucho más rápido que la fatiga de alto ciclo, tomando menos ciclos para producir la fractura final. Puesto que la grieta crece más rápidamente, la textura superficial es más áspera, el color es gris más oscuro – con menor reflexión de luz y las marcas de playa aparecen más espaciadas y más fáciles de ver. Como quiera que la fatiga de bajo ciclo sea causada a menudo por ciclos de sobrecarga severa, se debe esperar que aumente el tamaño de la fractura final.

Marca de playa (1)

Las marcas de playa se encuentran a menudo en fracturas por fatiga. Se pueden usar para determinar el punto de iniciación de la fractura. Una marca de playa se forma cuando una fisura por fatiga cambia de velocidad. Si la velocidad no cambia, las marcas de playa no serán visibles. En materiales duros pueden no formarse marcas de playa.

Marcas de trinquete (2)
Las marcas de trinquete pueden presentarse en una fractura por fatiga. Indican alto esfuerzo y múltiples puntos de iniciación, o sea que varias facturas por fatiga comenzaron más o menos al mismo tiempo y casi en la misma ubicación pero en planos diferentes. A medida que las grietas por fatiga crecen, las fracturas individuales pueden juntarse y formar una grieta grande.

Fractura final (3)
El tamaño de la fractura final es una indicación de la severidad de la carga aplicada. Las fracturas finales grandes generalmente indican cargas altas, mientras que fracturas finales pequeñas indican cargas más bajas.

Fatiga por tensión
La fatiga por tensión produce marcas de playa circulares concéntricas a la circunferencia. Estas fracturas suelen iniciarse en el exterior con la fractura final debajo de la superficie, o pueden comenzar debajo de la superficie y crecer hacia fuera.

Fatiga por flexión
La fatiga por flexión produce marcas de playa que se inician en un punto y se propagan hacia fuera hacia el otro lado de la pieza como ondas sobre el agua. La flexión inversa pueden iniciar dos fracturas por fatiga una en cada lado de la pieza con marcas de playa moviéndose una hacia la otra. La flexión rotativa produce marcas de playa que crecen hacia adentro desde la circunferencia. La fractura final ocurre en la región central

Fatiga por torsión
Las grietas por fatiga por torsión dejan a menudo marcas de playa distintivas y avanzan en ángulos de 45 grados dentro de la pieza. A menudo se presentan varias fracturas ramificadas.

Fatiga por esfuerzo constante
Las fracturas por fatiga producidas por cargas de corte longitudinal por lo general crecen a lo largo de la línea de flujo del grano, dejando algo de apariencia leñosa.

Patrón de escalón
Ocasionalmente, una fractura por fatiga se dividirá en varias fracturas más pequeñas en la parte media de la fractura debido a cambios en la geometría de la pieza o por aumento del esfuerzo. Si estas fracturas se recombinan en una sola fractura, se puede formar una serie de marcas llamadas “escalones”.

3.1 Concentradores de esfuerzos anormales

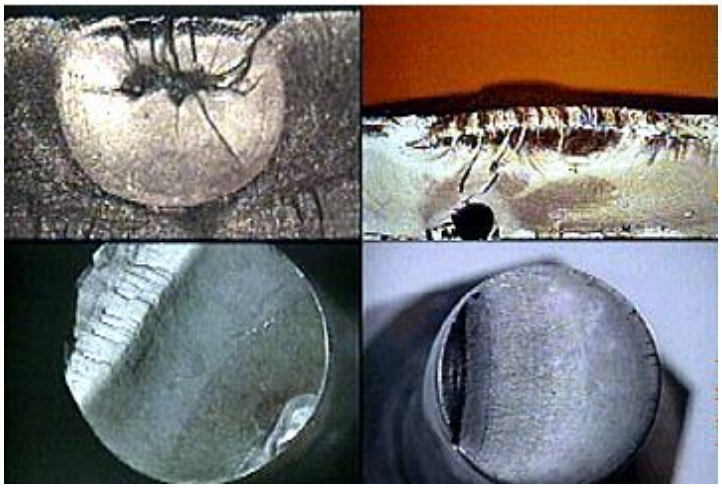


Figura 196

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Una vez localizado el punto de inicio de la fractura, es importante averiguar porque ocurrió. Concentradores de esfuerzo anormales pueden causar fracturas. Los concentradores de esfuerzo anormales incluyen problemas de material, fracturas de proceso, daño por mala manipulación, cortes y ranuras.

Problemas de material

Los problemas de material tales como inclusiones y bolsas de contracción generalmente son internos, indicando que los puntos de inicio pueden estar por debajo de la superficie. La forma de inclusión puede ser esférica, o larga y delgada como una mina de lápiz. Las bolsas de contracción son cavidades de forma irregular. Las inclusiones pueden iniciar fracturas por fatiga en el interior de la pieza. Si la fractura se inicia en una inclusión esférica o a través de una inclusión larga y delgada, puede producir una apariencia de ojo de buey. La fractura se desarrolla muy lentamente alejándose de la inclusión, creando la apariencia de un blanco u objetivo con la inclusión en el centro del blanco. Si la fractura comienza a lo largo de la longitud de una inclusión, en lugar de un blanco u objetivo veremos una apariencia de fatiga normal.

3.2 Fracturas por proceso

Si las fracturas superficiales se crean durante el moldeado del metal, tratamiento térmico o procesamiento, se llaman “pre-fracturas” y actúan como concentradores de esfuerzo severo cuando se ejerce carga sobre la pieza. La mayoría de las pre-fracturas son dúctiles o frágiles y se pueden reconocer por su textura de superficie diferente. Las fracturas por fatiga con marcas de playa y marcas de trinquete pueden comenzar en la parte inferior de la pre-fractura.

Algunas veces las pre-fracturas pueden identificarse por escamas de forjado oscuras u óxidos del templado dentro de la fractura. Esto indica que la fractura se originó durante el tratamiento térmico – una posible solapa de forjado o grieta durante el templado por inmersión. Algunas veces una pre-fractura tiene pintura, herrumbre, u óxidos en su superficie buena evidencia de que la fractura existió antes de que la pieza fuera colocada en servicio.

Cortes y ranuras
Otra fuente de concentradores de esfuerzo es el daño de superficie. Prácticas de ensamblaje inadecuadas, mal manejo de las piezas, desgaste o corrosión pueden crear este tipo de daño. Las piezas que fallaron se deben comparar con piezas en buen estado para determinar si existe una condición de superficie anormal.

Contornos incorrectos
Los cambios de contorno son otra forma de concentradores de esfuerzo. Algunos esfuerzos son: agujeros, ranuras, filetes y muescas. Si no se mantiene la exactitud dimensional, los cambios de contorno se vuelven más abruptos convirtiéndose en un concentrador de esfuerzo anormal.

Para determinar si una pieza puede tener un problema de contorno, compárela con una nueva, una usada en buen estado, o tome medidas para verificar las dimensiones.

Cavidades de contracción
Las cavidades de contracción son otro tipo de problema interno que puede causar que las fracturas por fatiga crezcan hacia el exterior, o superficie, de la pieza. Algunas cavidades de contracción se pueden identificar por las llamadas “dendritas”. Las dendritas son largas filas de granos de metal esféricos. Cavidades de contracción grandes pueden debilitar una pieza lo suficiente para causar la fractura en condiciones de carga normales.

Cargas excesivas
Antes de decidir que una falla se debe a problemas de material, asegúrese de verificar que la carga no fue excesiva. Cargas excesivas pueden iniciar fracturas en inclusiones de tamaño normal.

Abolladuras
Es importante examinar los puntos de inicio de fracturas por el daño de superficie.

Sobrecargas cíclicas
Si al examinar cuidadosamente el punto de inicio de una fractura, hay evidencia de un concentrador de esfuerzo anormal, se deben buscar indicaciones de una sobrecarga cíclica. Hay tres indicaciones principales de sobrecarga cíclica: múltiples puntos de inicio, grandes fracturas finales y una fatiga de ciclo bajo.

Múltiples puntos de inicio
A menudo las sobrecargas cíclicas dan comienzo a varias fracturas por fatiga en diferentes puntos de inicio. Generalmente la fractura contiene marcas de trinquete que indican una carga cíclica excesiva.

Fracturas finales grandes
Si las sobrecargas cíclicas continúan luego de iniciar una fractura por fatiga, generalmente el tamaño de la fractura final es mayor que si hubiera sido bajo condiciones de carga normales.

Fatiga de ciclo bajo
La fatiga de ciclo bajo es un buen indicador de carga cíclica excesiva. La fatiga de ciclo bajo produce superficies más ásperas y oscuras con prominentes marcas de playa con mucho espacio entre ellas.

Marcas de trinquete
Las sobrecargas cíclicas a menudo tendrán varios puntos de inicio de la fractura y marcas de trinquete. Si las sobrecargas cíclicas continúan después de que ha comenzado la fractura por fatiga, el resultado será una gran fractura final.

Baja resistencia de material

Figura 197

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Si no hay evidencia de concentradores de esfuerzo anormal o cargas cíclicas excesivas, busque evidencia de baja resistencia de material. Hay varios indicadores que podemos usar para ayudar a identificar la baja resistencia de materiales: colores del templado, deformación plástica excesiva, marcas de identificación, o profundidad de superficie endurecida

Color de templado
Los colores de templado en el acero son el resultado de excesivo calentamiento y oxidación. Los colores dorado pajizo o azul pálido indican que la pieza fue expuesta a temperaturas por encima de 500 grados Fahrenheit.
A medida que las temperaturas aumentan por encima de los 1000 grados Fahrenheit, los colores de templado se tornan negros y se forman gruesas capas de óxido en la superficie.

Deformación plástica excesiva
La deformación plástica excesiva o material derretido es otro buen indicador de que una pieza ha experimentado temperaturas suficientemente altas para perder resistencia.

Marcas de identificación
Algunas veces las piezas de baja resistencia se pueden identificar por marcas. Por ejemplo, los tornillos generalmente tienen marcas de identificación que indican su resistencia relativa. El tornillo de la izquierda con más líneas radiales indica mayor resistencia que el tornillo de la derecha.

Profundidad de superficie endurecida
Una pieza puede tener baja resistencia de material por una inapropiada profundidad de superficie endurecida. La profundidad de superficie endurecida puede ser observada en las fracturas, y si no aparece se deben acumular más datos en esa área.

3.3 Cinco conceptos básicos de desgaste

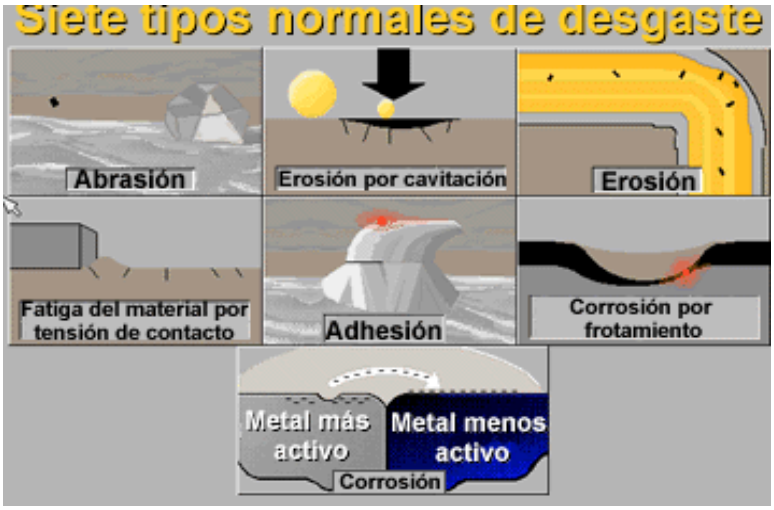


Figura 198

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

La meta de este módulo es darle los conocimientos necesarios para analizar fallas debidas a desgaste, encontrar la causa del desgaste y seleccionar la acción correctiva adecuada. Es muy importante que estas tareas se hagan correctamente para evitar que se repitan fallas que pueden resultar muy caras.

Se define el desgaste como la pérdida progresiva del material de la superficie debida al movimiento relativo y al contacto entre superficies. Los distintos productos tienen muchos componentes que se desgastan al hacer su trabajo, lo que hace necesario reemplazar esos componentes periódicamente. Algunas piezas, como por ejemplo las herramientas de penetración del suelo, trabajan en condiciones de desgaste muy serio y tienen un promedio corto de vida útil. Las piezas que se encuentran dentro de las máquinas, están protegidas y se desgastan más lentamente. Los usuarios saben que hay que cambiar periódicamente los componentes que se desgastan. Pero cuando las condiciones de trabajo o del medio ambiente son anormales, las tasas de desgaste aumentan. Es posible que haya que reemplazar algunos componentes antes de que hayan alcanzado la vida útil esperada. Si usted conoce cuál es la condición anormal que acelera el desgaste, podrá anticipar las piezas que han sufrido el daño. Pero frecuentemente tendrá que observar las piezas y descubrir, a partir de esa observación, cuál ha sido la condición anormal que ha producido el desgaste acelerado. El análisis de desgaste es más fácil si usted está familiarizado con la máquina y sus aplicaciones, su funcionamiento y su mantenimiento. Esta familiaridad hace que el operador está al tanto del posible efecto de las condiciones de trabajo y permite entender los requisitos de operación y las prácticas de mantenimiento.

Técnicas adecuadas de análisis de desgaste

Un buen análisis de desgaste requiere observar, anotar y pensar utilizando los datos, los pasos 3 y 4 de los ocho pasos del análisis práctico de fallas.

Cinco conceptos básicos de análisis de desgaste

Su tarea será más fácil si sigue el procedimiento adecuado de análisis de desgaste: observe las características de la superficie, identifique el tipo de desgaste, observe dónde ocurre el desgaste, haga una lista de las condiciones que pueden causarlo y determine qué hacer a continuación para obtener más información.

- **Obtenga** información acerca de las características de la superficie. Observe y anote la textura, el color, la forma, el tamaño y cualquier pequeño detalle que pueda observarse con magnificación y buena iluminación.
- **Identifique** el tipo de desgaste. Las características de la superficie pueden ayudarle a identificar el tipo de desgaste porque cada tipo de desgaste produce características de superficie específicas
- **Identifique** dónde ha ocurrido el desgaste. ¿estaba descentrado? ¿ocurrió en superficies que no deberían estar en contacto? Estos detalles le ayudarán a determinar si el problema se debe a cuestiones de carga, alineación, espacio libre o lubricación. Se trata de reducir la lista de causas posibles al número más pequeño posible de causas básicas
- **Enumere** las condiciones que pueden haber hecho posible las características de la superficie, el tipo de desgaste y la ubicación del desgaste que ha observado.

- **Determine** qué tipo de mantenimiento, operación, aplicación o problema de piezas puede haber producido las características de la superficie, el tipo de desgaste y la ubicación del desgaste que ha observado.

¿Qué hacer a continuación?
Enumere las condiciones que pueden haber facilitado el desgaste y decida cuáles son más probables y cuáles son menos probables. Basándose en los datos del desgaste que ha observado, ¿cuál de estas condiciones explicaría la mayoría de los datos? Esta será la condición más probable. La condición menos probable será la que explique el número más pequeño de datos observados. El paso siguiente es investigar la condición que usted ha determinado que es la más probable.

Siete tipos normales de desgaste
Hay siete tipos normales de desgaste que explican la gran mayoría de las fallas por desgaste anormal. Estos siete tipos de desgaste son: abrasión, adhesión, erosión, erosión por cavitación, corrosión, corrosión por frotamiento y fatiga del material por tensión de contacto. La abrasión explica la mayoría de los casos de fallas por desgaste anormal, mientras que la adhesión es el tipo de desgaste que progresa con mayor rapidez. Cada tipo de desgaste desarrolla sus propias características superficiales, lo que le ayudará a usted a identificarlo. Al realizar el análisis de desgaste deberá preguntarse: ¿qué tipo de desgaste existe y, más importante, qué lo ha producido?

Desgaste abrasivo
El desgaste abrasivo puede imaginarse como una acción de corte. Las superficies dañadas como resultado de desgaste abrasivo son cortadas, acanaladas o ranuradas. Si existe una capa de lubricante, se podrá eliminar o reducir la producción de calor y el desgaste de la superficie. En el desgaste abrasivo entre dos cuerpos, dos superficies se deslizan una contra otra. En el desgaste abrasivo entre tres cuerpos, partículas quedan atrapadas entre dos superficies que están en movimiento.

Abrasión entre dos cuerpos
Si dos superficies se deslizan una contra otra se dice que existe desgaste abrasivo entre dos cuerpos. Los puntos salientes de una de las superficies frotarán y cortarán la otra superficie como resultado del deslizamiento relativo entre las superficies. Al comienzo de este tipo de desgaste, el calor producido en los puntos de contacto es eliminado por las capas de lubricante o por conducción al resto de las dos piezas.

Ejemplo de abrasión entre dos cuerpos

Figura 199

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Este engranaje muestra abrasión entre dos cuerpos debida a mal alineamiento.

Partículas abrasivas

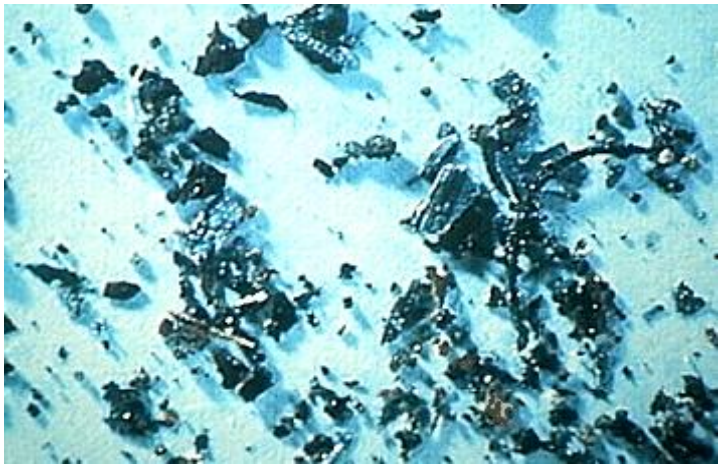


Figura 200

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Partículas abrasivas son partículas de cualquier tipo o tamaño que sean tan duras o más duras que la superficie que se desgasta. Suelen ser partículas de material abrasivo de discos de esmerilar, partículas de pintura, polvo, arena, suciedad y virutas de metal.

Características de la superficie

Las características de la superficie producidas por el desgaste abrasivo varían dependiendo de las condiciones abrasivas existentes. Superficies pulidas, superficies satinadas y superficies con cortes y ranuras son causadas por tipos distintos de partículas.

- superficies pulidas

- superficies satinadas
- superficies con cortes y ranuras

Superficie pulida
Partículas abrasivas pequeñas y duras, como partículas de polvo, pueden entrar en la mayoría de los sistemas y producen cortes y arañazos finos que dejan una apariencia pulida.

Ejemplo de superficie pulida

Figura 201

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Note las superficies que parecen espejos en estos dientes de engranaje. Fueron causadas cuando entró lado al lubricante debido a sellos en malas condiciones.

Superficie satinada
Partículas abrasivas duras un poco más grandes, como partículas de arena fina, producen cortes y arañazos más grandes y dejan un acabado superficial satinado o un aspecto mate.

Ejemplo de superficie satinada

Figura 202

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Esta pieza muestra daño causado por partículas abrasivas duras. Note la superficie satinada.

Superficie con cortes y ranuras

Partículas abrasivas duras y grandes, como partículas grandes de arena o partículas residuales de maquinado, pueden producir arañazos y ranuras profundas.

Ejemplo de partículas incrustadas

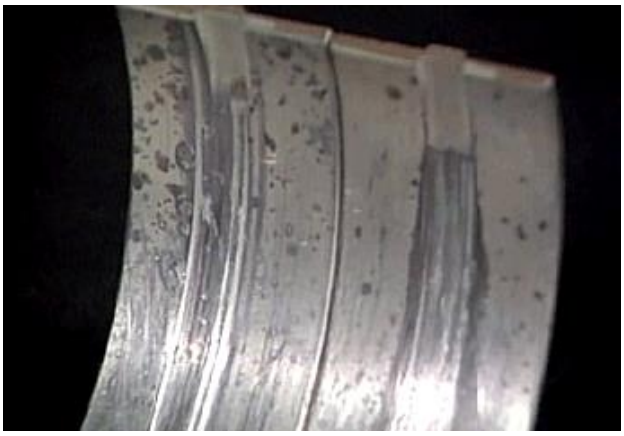


Figura 203

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Si las superficies son blandas, como en este cojinete de biela de un motor diésel, las partículas pueden incrustarse en la superficie

Melladuras o abolladuras

Figura 204

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Note la secuencia temporal del daño. Si faltan partículas incrustadas de sus agujeros, es una indicación de que se continuó la operación después que las partículas se incrustaran, por lo que se rompieron o se movieron de su sitio. Si las superficies son duras, las partículas normalmente no se incrustan pero pueden causar melladuras o abolladuras.

Partículas incrustadas

Es importante notar la secuencia temporal del daño. Cortes y arañazos pueden ocurrir encima de las zonas incrustadas o puede ocurrir incrustamiento encima de arañazos. Si continúa la operación después de haberse incrustado las partículas, éstas pueden romperse o moverse. Vea si hay zonas en las que falten partículas incrustadas en sus agujeros.

Desgaste por adherencia

El desgaste adhesivo comienza cuando asperezas o puntos elevados muy pequeños en superficies móviles hacen contacto entre ellos y generan calor de fricción hasta que uno de los puntos elevados se adhiere al otro y se separa de la superficie en la que estaba originalmente. Como se trata solamente de puntos muy pequeños, este proceso se llama soldadura microscópica. Si se continúa la operación de ese componente, el contacto entre las superficies aumenta y áreas más amplias pueden fundirse y adherirse. Las temperaturas de adhesión pueden alcanzarse en cuestión de segundos cuando las superficies están muy cargadas.

Soldadura microscópica

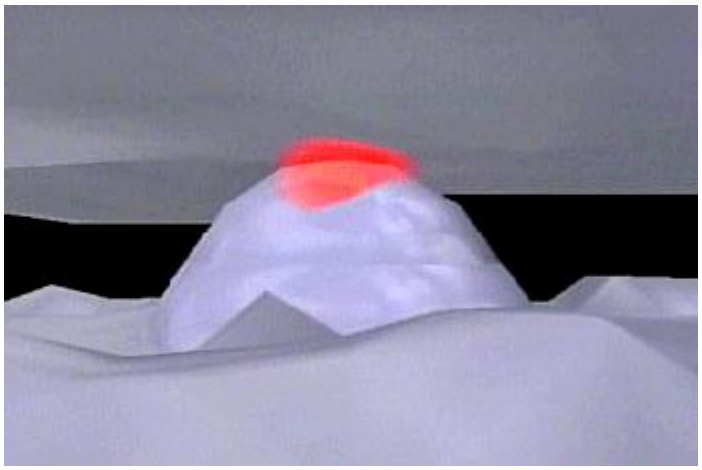


Figura 205

Durante el desgaste adhesivo, las superficies entran físicamente en contacto y puntos elevados muy pequeños hacen contacto, generan calor y se sueldan microscópicamente. Debido a que con mucha frecuencia falta lubricante, se sigue acumulando calor hasta que se produce un fundido y una adhesión más generalizados

Soldadura macroscópica

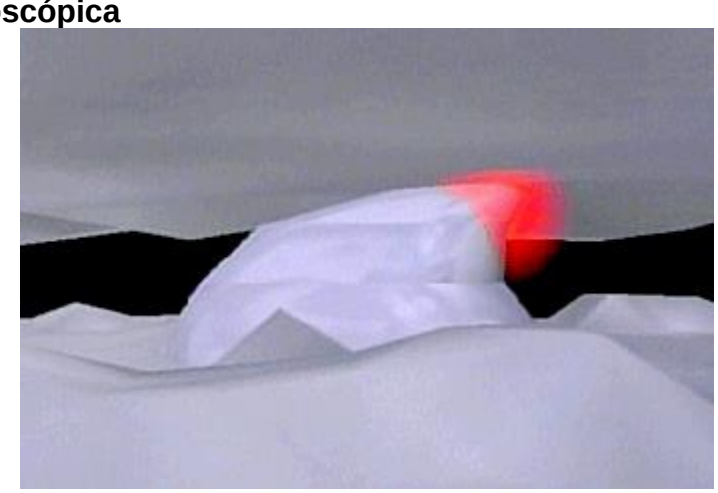


Figura 206

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Si se permite que continúe la operación bajo condiciones severas de desgaste adhesivo, aumenta el contacto y áreas más amplias pueden fundirse y adherirse.

Características de la superficie
Entre las características superficiales del desgaste adhesivo se encuentran:

- pulido
- decoloración y adhesión
- deformación plástica
- colores de revenido
- fractura

Pulido

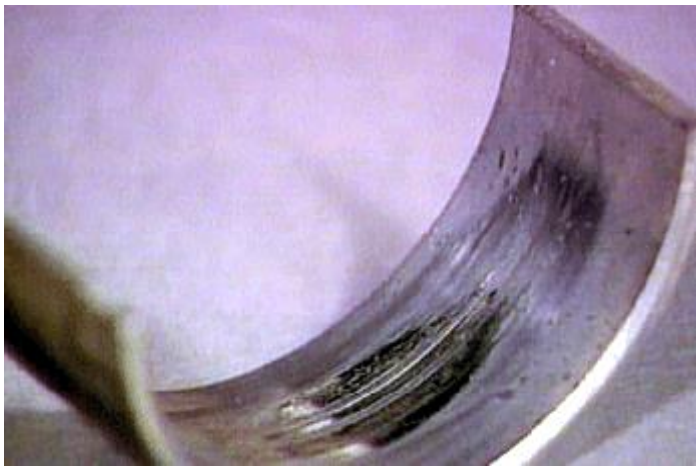


Figura 207

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

En las fases iniciales de desgaste adhesivo, observará pulido de la superficie y un aumento en la reflexión de luz. A medida que las asperezas frotan unas con otras, se calientan, se funden microscópicamente y se separan de la superficie original, las superficies se hacen más lisas. Algo de pulido ocurre normalmente durante el uso inicial de productos nuevos. En la mayoría de los casos, las piezas no se dañan en esta fase inicial porque lo único que ocurre debido al desgaste adhesivo es que las superficies se hacen más lisas.

Estos cojinetes de un motor diésel de camión muestran las fases iniciales de desgaste adhesivo. Note la superficie pulida.

Decoloración y adhesión

Figura 208

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

En las fases intermedias del desgaste adhesivo, se observan raspaduras, ralladuras, decoloración y adhesión. Al continuar el desgaste adhesivo, toda la superficie de contacto puede recalentarse y secciones grandes de la superficie pueden alcanzar la temperatura de fusión, adherirse y separarse de la superficie original.

Deformación plástica

Figura 209

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

En las fases más avanzadas del desgaste adhesivo, se observa deformación plástica. Esto ocurre cuando se alcanzan temperaturas muy altas.

Los dientes de este engranaje han alcanzado temperaturas tan altas que se han ablandado, han perdido resistencia y se han deformado. Esto ha producido interferencia

entre los dientes y causado más deformación plástica. Se puede observar también el color negro de revenido que indica que se alcanzaron temperaturas elevadas.

Colores de revenido

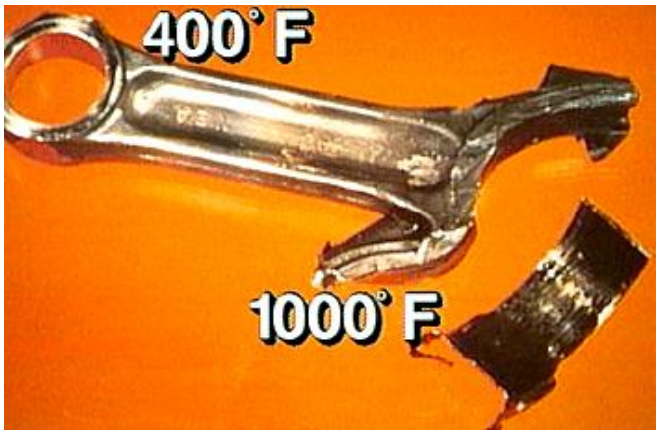


Figura 210

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Cuando se alcanzan temperaturas muy altas en piezas de acero, se ven con frecuencia colores de revenido. Los colores de revenido son causados por óxidos metálicos que producen una gama de colores desde amarillo dorado a azul claro, azul oscuro, gris y negro.

Fracturas

Figura 211

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Fracturas ocurren frecuentemente como resultado del desgaste adhesivo porque la pieza ha sido debilitada por las elevadas temperaturas. El faldón de este pistón se calentó tanto que se fundió y se adhirió a la camisa del cilindro. Las altas temperaturas redujeron también la resistencia del faldón y se produjo una fractura.

Desgaste por erosión

El desgaste por erosión ocurre cuando partículas en movimiento chocan con las superficies que las rodean. El desgaste por erosión puede explicarse como una acción de impacto. Generalmente las partículas son arrastradas por un fluido y son más pesadas que el fluido. Cuando cambia la dirección en que se mueve el fluido, el momento arrastra las partículas más pesadas hacia delante y golpean contra esquinas y restricciones, causando daños en las superficies.

Erosión

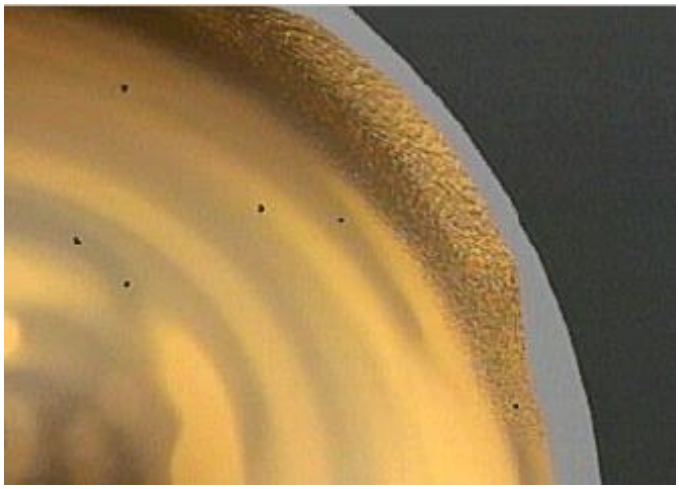


Figura 212

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

La erosión ocurre cuando partículas pequeñas y duras en fluidos que se mueven con rapidez, golpean las superficies circundantes a altas velocidades y causan impactos y daños abrasivos. La superficie así desgastada tiene frecuentemente un aspecto granallado o mate. Los filtros y los intervalos de cambio de filtro están diseñados para controlar el desgaste por erosión dentro de límites aceptables.

Características de la superficie

Las superficies erosionadas pueden tener una apariencia lisa, rugosa, afilada o áspera, dependiendo del tamaño, la dureza y el momento de las partículas erosivas.

- Lisa
- Rugosa
- Afilada
- áspera

Lisa

Figura 213

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Partículas erosivas pequeñas producen generalmente una apariencia de superficie lisa. Note las superficies lisas en este ejemplo.

Rugosa

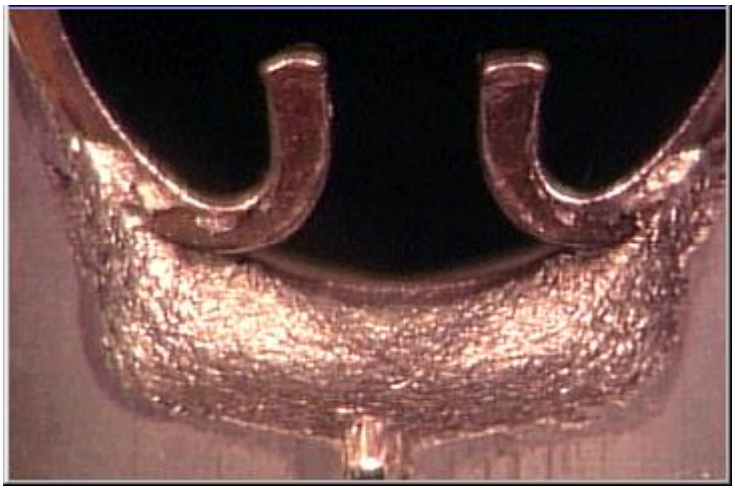


Figura 214

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Partículas más grandes pueden producir superficies rugosas. Si las partículas son más grandes y tienen más energía de impacto, la superficie será más rugosa.

Bordes afilados

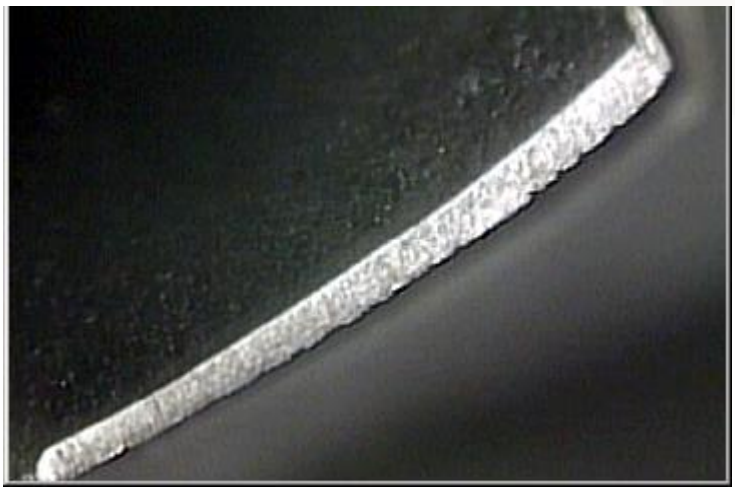


Figura 215

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Partículas abrasivas finas como el polvo, pueden afilar los bordes de piezas giratorias. Esta rueda de compresor de turbocompresor tiene bordes muy afilados causados por desgaste por erosión.

Áspera

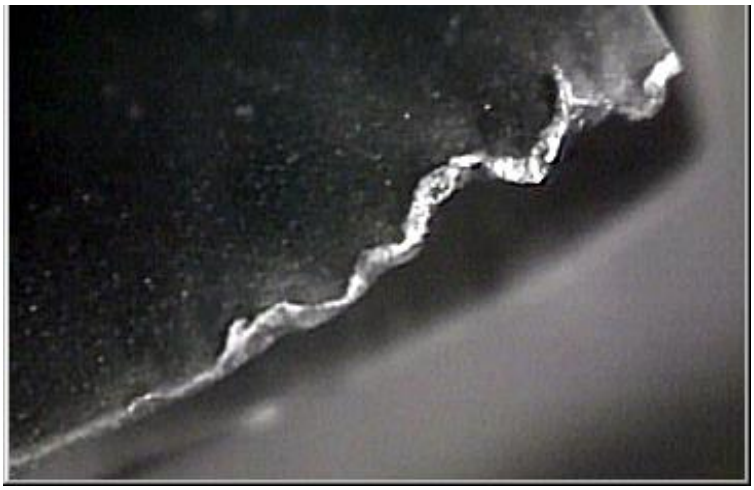


Figura 216

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Partículas de gran tamaño pueden impactar con severidad y causar características de superficie áspera. El extremo de los álabes de esta rueda de turbocompresor ha sido dañado de esta forma debido a choques a alta velocidad de partículas de gran tamaño.

Desgaste por erosión por cavitación

La erosión por cavitación puede explicarse como causada por una acción de impacto. El impacto es causado por fluido golpeando las superficies y no por partículas duras. La erosión por cavitación resulta cuando las burbujas de vapor que se encuentran en el fluido se colapsan cerca de una superficie causando chorros pequeños de fluido a alta velocidad que golpean contra la superficie. Esta acción ocurre principalmente en zonas en las que la presión aumenta repentinamente. Si el aumento de presión es gradual, las burbujas normalmente se hacen más pequeñas pero no se colapsan.

Pero si la presión cambia repentinamente, las burbujas pueden colapsarse hacia adentro, o implosión, enviando chorros de fluido a alta velocidad contra la superficie. Si la superficie no es suficientemente fuerte para resistir el impacto del fluido, puede llegar a deformarse y agrietarse después de una serie de implosiones. Las grietas superficiales pueden ser debidas a fragilidad o a fatiga de la superficie. Estas grietas crecen hacia adentro, se unen unas con otras y liberan trozos de material de la superficie formando picaduras en la superficie.

Erosión por cavitación

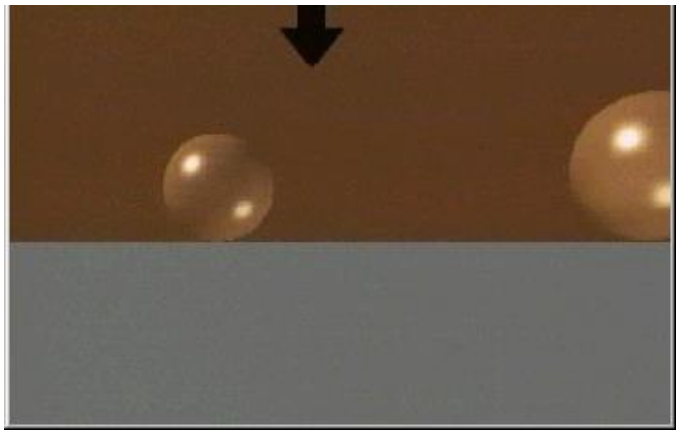


Figura 217

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

La erosión por cavitación es similar a una acción de impacto, en la que un material choca con la superficie de la pieza. En este caso, el material que choca con la superficie es un fluido.

Picaduras

Las superficies más fuertes no se agrietan. En este caso, los chorros de fluido que golpean la superficie contribuyen a limpiarla. Pero como las superficies limpias se corroen con más rapidez que las superficies sucias, aumenta el desgaste corrosivo en las zonas limpias, formando picaduras que crecen lentamente. Durante un periodo de tiempo suficientemente largo, estas picaduras se hacen más profundas y a veces, pueden atravesar completamente el metal.

Aditivos de refrigerante

Para algunas situaciones, existen aditivos que recubren las superficies metálicas con una capa que las protege contra la erosión por cavitación. Por ejemplo, en los sistemas de enfriamiento de los motores diésel, estos aditivos recubren con una capa protectora las camisas y otros componentes sensibles. Las burbujas siguen estando presentes y continúan colapsándose, pero las superficies metálicas están protegidas por esta capa de aditivo.

Característica de la superficie

Figura 218

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Al igual que en otros tipos de desgaste, la erosión por cavitación produce sus propias características superficiales específicas. Entre los ejemplos se encuentran.

- grietas superficiales
- picaduras
- agujeros mellados
- túneles abovedados

Grietas

Este cojinete de biela tiene una capa superficial de plomo-estaño que es blanda y ha sido atacada por burbujas al colapsarse. Una inspección detallada muestra que la capa de plomo-estaño se está reflexionando, agrietándose y separándose de la pieza.

Picaduras

La capa de aluminio en este cojinete de biela se está agrietando y picando en una zona de aumento súbito de presión. La superficie ha desarrollado características irregulares y asperezas. Note también que a medida que se remueven partículas de aluminio de la superficie, estas partículas causan desgaste abrasivo aguas abajo y algunas se han incrustado en la superficie blanda del cojinete

Agujeros mellados

La erosión por cavitación puede formar picaduras irregulares tal como se ve en esta placa de flexión de bomba hidráulica. Una inspección más detallada revela las características de superficie mellada causada por burbujas implosionando contra la superficie de bronce. Si se observan con amplificación, las superficies parecen tener agujeros abovedados. Algunas veces, las superficies que han sufrido erosión por cavitación brillan cuando se las gira bajo luz brillante. Esta caja de bomba de agua brilla, lo que indica que las picaduras contienen fracturas frágiles.

T

úneles abovedado

Cuando las piezas son demasiado fuertes para deformarse y desarrollar grietas, la erosión por cavitación puede producir un aumento en el ritmo de erosión superficial localizada. Como se mencionó anteriormente, las camisas de cilindro de motores diésel pueden desarrollar corrosión superficial localizada después de muchos meses de uso. Una inspección detallada de este daño superficial muestra que las implosiones y la corrosión pueden eliminar metal de la superficie de forma errática, dejando agujeros mellados y abovedados.

Desgaste por corrosión

Figura 219

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Técnicamente, la corrosión es una acción química y no una acción de desgaste. Pero debido a que la corrosión causa el deterioro de las superficies de desgaste, la incluimos como un tipo de desgaste. Hay tres tipos de corrosión que debemos considerar: general, galvánica y a alta temperatura.

Corrosión general

La corrosión general ocurre generalmente cuando se dan tres condiciones: una zona catódica, una zona anódica y un electrólito que conecta el cátodo con el ánodo. El cátodo y el ánodo se encuentran a voltajes diferentes lo que causa el paso de una corriente eléctrica entre ellas, a través del electrólito. Los ánodos son más activos químicamente que los cátodos y sufren corrosión y picaduras, mientras que las zonas catódicas no sufren daños.

La velocidad de la corrosión es determinada por muchos factores, incluyendo temperatura, propiedades del electrólito, propiedades del metal, aditivos en el lubricante, grietas y el movimiento relativo entre el metal y sus alrededores.

Corrosión galvánica

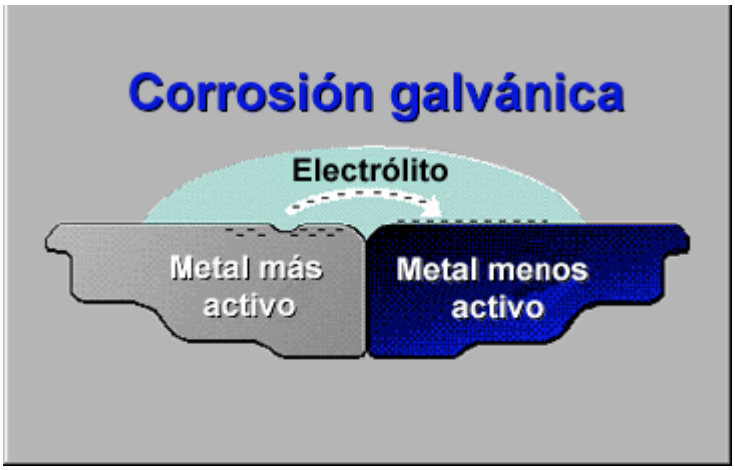


Figura 220

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Recuerde que la corrosión galvánica ocurre cuando dos metales diferentes están conectados por un electrólito. El metal más activo se convierte en el ánodo y el menos activo será el cátodo.

Alta temperatura

La oxidación a alta temperatura no es una verdadera forma de corrosión pero puede causar un rápido deterioro de la superficie. A medida que la temperatura se aproxima al punto de fusión, los átomos del metal se mueven con mayor rapidez y el oxígeno puede penetrar el metal hasta mayor profundidad, formando un depósito de óxido en unos segundos.

Si el metal caliente está doblado, el depósito quebradizo se separa de la superficie, tal como se muestra.

Características de la superficie

Los metales corroídos suelen tener superficies picadas, capas de corrosión superficial escamosas o ambos tipos. Las capas superficiales pueden formar hendiduras y causar que el ritmo de corrosión se acelere debajo de las escamas.

El color identifica el tipo de metal

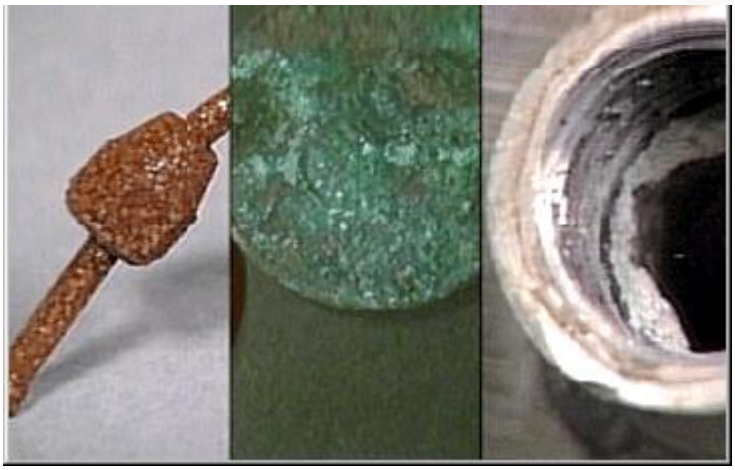


Figura 221

Las capas de corrosión superficial suelen ser óxidos metálicos y pueden tener distintos colores. Las superficies de acero o de hierro suelen desarrollar una capa de corrosión de color marrón rojizo. Las capas de corrosión de cobre y de bronce son de un color verde azulado. Las capas de aluminio suelen ser de color gris claro o blancuzco.

Corrosión del aluminio

Cuando la capa superficial de cobre/estaño de este cojinete de biela fue penetrada, la corrosión comenzó en la capa de aluminio que había debajo, levantando e inflando las capas superficiales. Cuando se levanta la capa superficial, se pueden ver debajo los derivados de color blancuzco de la corrosión del aluminio. Es similar a la corrosión que se puede observar alrededor del terminal de una batería.

Este colector de aceite de aluminio sufrió corrosión galvánica cuando se atornilló una correa de soporte de acero, que es menos activo e hizo de cátodo, contra el colector de aluminio, que es más activo e hizo de ánodo. Durante la operación, el agua y la sal que se encuentran al conducir por carretera, proporcionan el electrólito entre los metales y comenzó la corrosión. Se desarrollaron picaduras en el aluminio, se concentraron los esfuerzos en las picaduras y se produjo una grieta.

Ubicación del desgaste

La corrosión general ocurre donde el electrólito conecta el ánodo y el cátodo. La corrosión galvánica ocurre donde dos metales diferentes hacen contacto en un electrólito. La oxidación ocurre en zonas de temperatura elevada.

Corrosión general

Figura 222

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

La corrosión general ocurre donde el electrólito conecta el ánodo y el cátodo. Note que en esta biela la corrosión ha ocurrido donde hubo gotas de agua sobre la superficie. El agua proporcionó el electrólito y varios componentes metálicos actuaron como cátodos y ánodos.

Corrosión galvánica

Figura 223

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

La corrosión galvánica ocurre donde dos metales diferentes hacen contacto en un electrólito.
Aquí, un tubo de cobre ha sido sujetado por una placa espaciadora en un núcleo de enfriador. Ha habido corrosión solamente donde el tubo de cobre estaba en contacto con la placa.

Oxidación a alta temperatura

Figura 224

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

La oxidación a alta temperatura ocurre en zonas de temperatura elevada. Estas piezas de turbocompresor se dañaron debido a la temperatura excesivamente alta del escape. El blindaje térmico estuvo expuesto directamente al escape caliente y se ha oxidado por completo.

Corrosión por frotación

La corrosión por frotación es algo parecido a una soldadura por fricción. Ocurre cuando componentes que encajan muy apretado tienen que moverse unos contra otros a alta frecuencia y a baja amplitud. El calor friccional que se desarrolla entre las asperezas de las superficies deslizantes causa soldaduras microscópicas y desgarro del metal. Estas altas temperaturas localizadas pueden oxidar y descolorar el material que se ha desplazado. En caso de acero, los óxidos pueden acumularse como un polvo de color marrón rojizo, una condición común en uniones por medio de estrías secas o se pueden transferir a las superficies metálicas adyacentes causando elevaciones superficiales de aspecto irregular.

¿Qué es la corrosión por frotación?

Figura 225

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

La corrosión por frotación es algo parecido a una soldadura por fricción. Ocurre cuando componentes que encajan muy apretado tienen que moverse unos contra otros a alta frecuencia y a baja amplitud.

Frotación frente a desgaste adhesivo

No se debe confundir la frotación o la corrosión por frotación con el pulido que ocurre en caso de desgaste adhesivo. Tanto la frotación como la corrosión por frotación requieren que haya un encaje ajustado con movimiento forzado y soldaduras microscópicas; el desgaste adhesivo puede ocurrir en una gran variedad de circunstancias.

Frotación frente al pulido

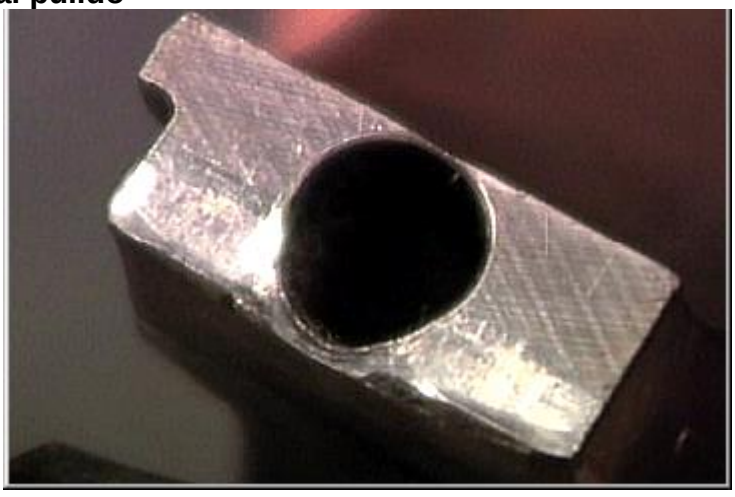


Figura 226

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Cuando considere frotación, recuerde: encaje ajustado, movimiento forzado y soldaduras microscópicas. Por otro lado, piezas que encajan con suficiente espacio

pueden chocar y rozarse produciendo superficies pulidas – pero eso no es una forma de corrosión por frotación.

Características superficiales

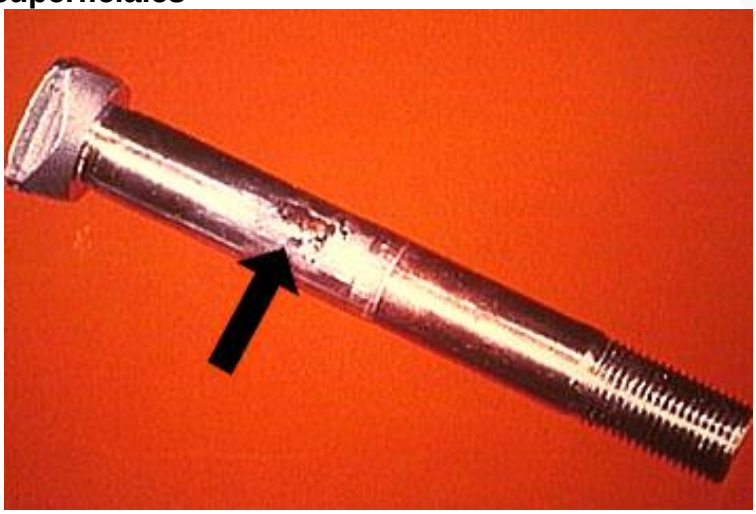


Figura 227

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Las superficies dañadas por corrosión por frotamiento pueden tener picaduras y acumulaciones de óxido de forma irregular. Este daño superficial puede ocurrir tanto en ambientes corrosivos como no corrosivos.

Corrosivo

En este perno de biela se han producido picaduras después de muchas horas de desgaste del tipo de corrosión por frotamiento. Note el color marrón rojizo en las picaduras, lo cual indica corrosión. El agujero donde estaba colocado el perno puede contener también acumulaciones de óxido y debe inspeccionarse bien antes de instalar un perno nuevo.

No corrosivo

Algunas veces, no se ven óxidos de color marrón rojizo porque el ambiente no era corrosivo. Pero verá las picaduras y las acumulaciones de óxido causadas por soldadura microscópica y desgarres.

Esta tapa de biela fue forzada a moverse contra la biela a pesar de que los pernos de retén estaban muy apretados. Como no había presente ni humedad ni electrólitos, no se nota herrumbre ni color de oxidación. Las soldaduras microscópicas están distribuidas uniformemente, lo que indica que el encaje era apropiado.

Ejemplos de corrosión por frotamiento
Otros ejemplos de corrosión por frotamiento son este eje y la placa de flexión de la bomba hidráulica.

Ubicación del desgaste
Los sitios probables donde se puede encontrar corrosión por frotamiento serán uniones apretadas sujetadas por tornillos, uniones por estrías y otras áreas de contacto en las que hay una carga comprensiva pesada. Cuando se encuentra corrosión por frotamiento en estas zonas, está indicando que ha ocurrido movimiento anormal y es necesario encontrar la causa.

Desgaste por fatiga por tensión de contacto

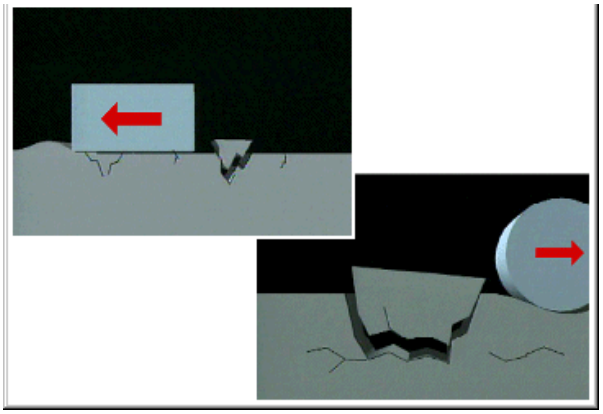


Figura 228

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

El desgaste por fatiga por tensión de contacto es parecido a una acción de flexión o de agrietamiento causado cuando superficies metálicas móviles hacen contacto bajo cargas cíclicas. El movimiento puede ser de deslizamiento o de rodadura. Las grietas por fatiga pueden desarrollarse en la superficie o debajo de ella y terminan produciendo picaduras o astillamiento.

Contacto por deslizamiento
Cuando dos superficies se deslizan una contra otra, se desarrollan tensiones que pueden causar la aparición de grietas en la superficie. A medida que las grietas se extienden y se unen, se desprende algo de material superficial y se forman picaduras. Cuando se pueden ver las picaduras en la superficie, las grietas han progresado hasta una mayor profundidad que lo que indican las picaduras.

Contacto por rodaduras
El contacto por rodadura hace flexionar la superficie produciendo una acción de cizalla dentro de la pieza. Las grietas suelen comenzar en una inclusión interna y crecen hacia la superficie. Las grietas por debajo de la superficie suelen ser muy extensas antes de que ocurra daño en la superficie. Esto permite que trozos grandes de material se separen del componente, un proceso que se llama desconchado o astillamiento.

Cuando las grietas comienzan cerca de la interfaz del núcleo de la caja, se llama triturado de la caja.

Características superficiales
La fatiga por tensión de contacto por deslizamiento y por contacto por rodadura tiene una característica superficial distinta.

Deslizamiento
Las superficies de los cojinetes de biela están sometidas a repetidas cargas por deslizamiento. Después de millones de ciclos de carga, pueden producirse grietas y picaduras en las capas superficiales debidas a fatiga por tensión de contacto. La capa de aluminio de este cojinete desarrolló grietas superficiales que progresaron hacia dentro. A medida que las grietas se iban uniendo, se caían trozos de la superficie y se formaban picaduras que se extendían cada vez a mayor profundidad. Finalmente, uno de los cojinetes dañados falló por completo.

Ondulaciones y picaduras
En piezas duras como este diente de engranaje, la tensión por contacto de deslizamiento puede causar flujo plástico o permanente de la superficie, una condición que se llama ondula miento. Cargas de deslizamiento más severas pueden causar grietas superficiales y picaduras localizadas. Si continúa la operación, las picaduras pueden ensancharse y hacerse más profundas. En dientes de engranaje, la fatiga por tensión de contacto de deslizamiento suele comenzar en la parte baja del diente y crece hacia arriba, produciendo picaduras en forma de V como las que se muestran.

Rodadura
Una tensión excesiva por contacto por rodadura hizo que la superficie de estos dientes de engranaje se flexionara hacia adentro, comenzando grietas de fatiga debajo de la superficie en la interfaz entra la superficie dura y el núcleo más blando. Las grietas crecieron hacia fuera y alcanzaron la superficie.

Triturado de la caja
Con el continuo uso, trozos grandes de la superficie se astillaron, exponiendo la superficie rugosa y fracturada que hay debajo. Esto se denomina triturado y ocurre también si los núcleos son muy blandos o las cajas muy delgadas.

Astillamiento y triturado de la caja
La fatiga por tensión por contacto de rodadura puede causar astillamiento y triturado de la caja. El astillamiento es causado por grietas que comienzan debajo de la superficie de la pieza y crecen hacia fuera. Cuando las grietas llegan a la superficie, se desprenden trozos de la superficie y exponen las zonas agrietadas que hay debajo.

Astillamiento y triturado de la caja
La fatiga por tensión por contacto de rodadura puede causar astillamiento y triturado de la caja. El astillamiento es causado por grietas que comienzan debajo de la superficie de la pieza crecen hacia fuera. Cuando las grietas llegan a la superficie, se desprenden trozos de la superficie y exponen las zonas agrietadas que hay debajo. El triturado de la caja es un agrietamiento que ocurre cerca de la interfaz entre el núcleo y la caja.

Sujetadores de roscas
Bienvenidos a la continuación del seminario de Análisis de falla. En este módulo trataremos de los sujetadores de rosca.

Primero, analizaremos la función, estructura y fabricación de pernos. Luego, trataremos de la instalación funcionamiento y posibles problemas de los sujetadores. Finalmente observaremos algunos ejemplos reales de fallas a fin de reforzar lo aprendido.
En esta presentación seguiremos los ochos pasos aplicables al Análisis de fallas y estaremos buscando datos que nos llevan a la causa original. Se deben completar los pasos (6,7 y 8) para obtener la recompensa, terminar nuestro trabajo y satisfacer a los clientes.

Funciones principales
Los sujetadores de rosca cumplen dos funciones principales:

- Primero, proporcionan la fuerza de sujeción en una unión con pernos.
- Segundo, transfieren la carga de una pieza a otra.

Si un perno está correctamente apretado o con el par de torsión correcto y las cargas de la unión son normales, no debe haber movimiento entre las dos piezas unidas. Por consiguiente, la única carga sobre el perno debe ser la de tracción.

Cualquier fuerza de corte o flexión presente en la unión, debe ser soportada por la fricción de las caras de la unión creada por la fuerza de sujeción debida a la tensión del perno.

Nota: Hay ciertas uniones con pernos que han sido diseñadas para deslizarse. Estas son excepciones a lo arriba mencionado y se usan en áreas donde la expansión y contracción térmicas son necesarias. Ejemplos son las uniones de múltiples de escape y del post enfriador al bloque de motor.

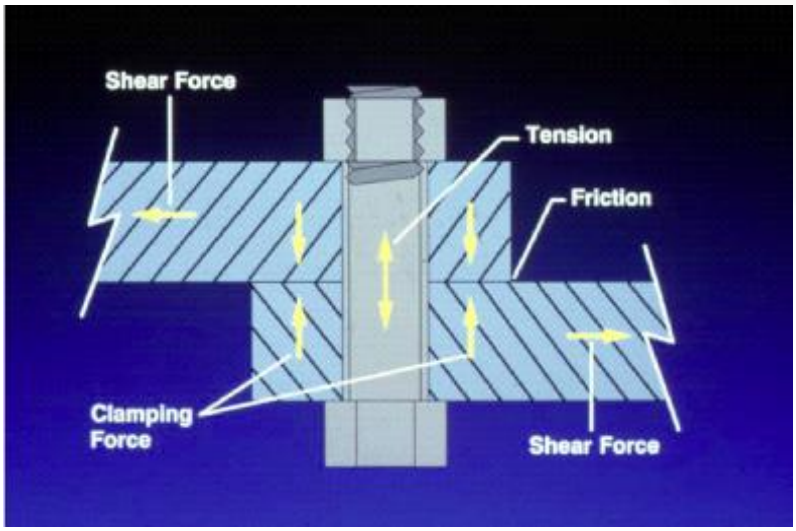


Figura 229

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

La fuerza de sujeción y la fricción de la unión funcionan juntas para transferir la carga de una pieza a la otra.

En cada unión con perno existe un cono de fuerza de sujeción efectiva sentida por las dos piezas unidas. La transferencia de carga de separación dentro del cono (en la línea central del cono en la diapositiva). El efecto es como si las dos piezas estuvieran soldadas en esta área.

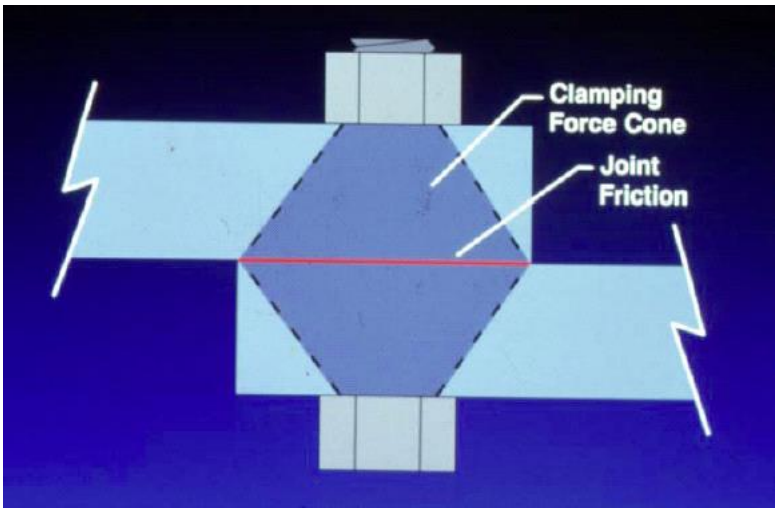


Figura 230

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Las piezas básicas de un perno son la cabeza, cara para arandela, filete debajo de la cabeza, espiga y roscas.

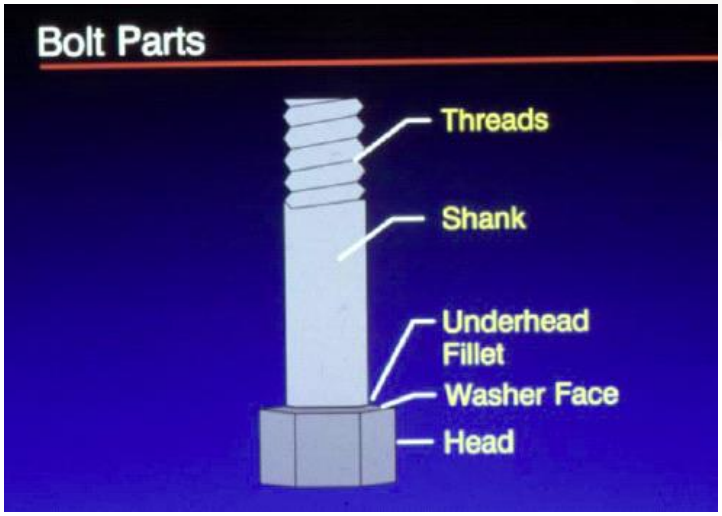


Figura 231

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Zonas del perno sometidas a los más altos esfuerzos:

- La primera raíz de rosca expuesta en el lado de la tuerca o rosca interior de la unión
- La primera raíz de rosca después de la espiga
- El filete debajo de la cabeza.

Cuando los pernos se rompen debido a sobrecarga, generalmente es en una de estas zonas de alto esfuerzo.

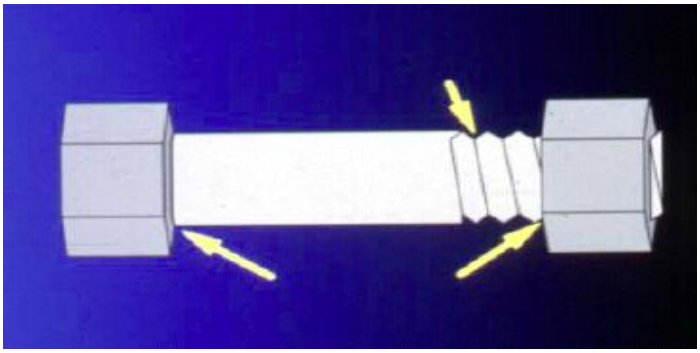


Figura 232

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Fabricación de pernos

Los pernos se fabrican de varillas de acero laminado en caliente que primero son:

- Tiradas a través de una matriz para obtener un diámetro especificado y luego
- Cortadas a una longitud especificada para formar la pieza bruta.

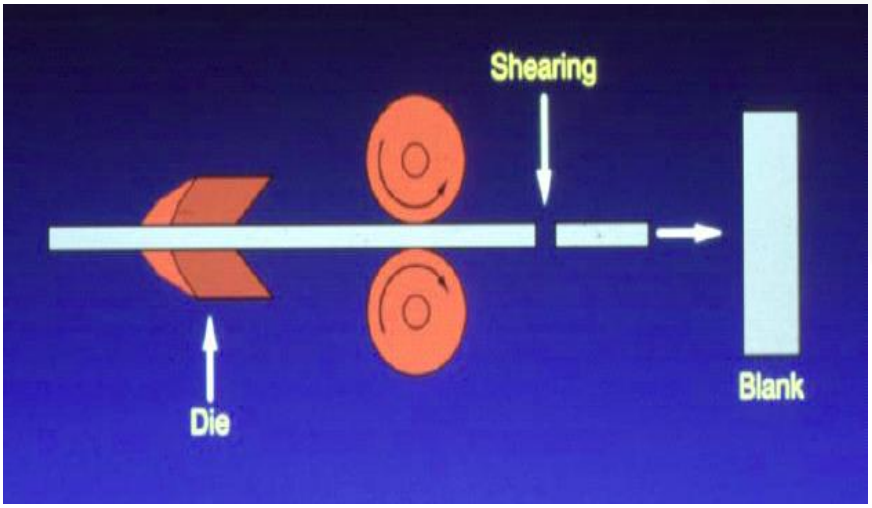


Figura 233

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

La mayoría de los pernos más pequeños son conformados por "moldeado en frío", donde la pieza bruta es martillada en matrices sucesivas a la temperatura ambiente.
Los perno más grandes (más de 1 1/4 pulgadas de diámetro) algunas veces son conformados por "moldeado en caliente" donde la pieza bruta se calienta a temperaturas especificadas antes de ser martilladas en matrices.

En el primer paso de un proceso de moldeado en frío o caliente, la pieza bruta es martillada dentro de una matriz que tiene un diámetro mayor en su sección superior para dejar material para la cabeza.

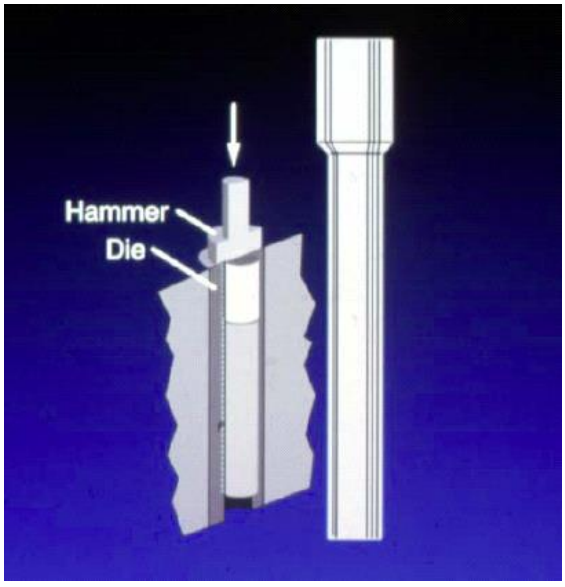


Figura 234

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Durante el próximo paso, la cabeza es martillada para darle forma redonda y biselada y se reduce el diámetro de la parte inferior de la pieza bruta que luego será roscada.

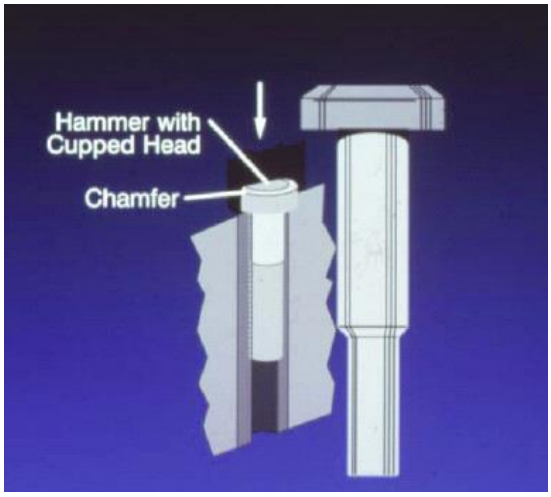


Figura 235

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

La cabeza redonda y biselada es entonces presionada dentro de una matriz recortadora que la corta dándole la forma final.

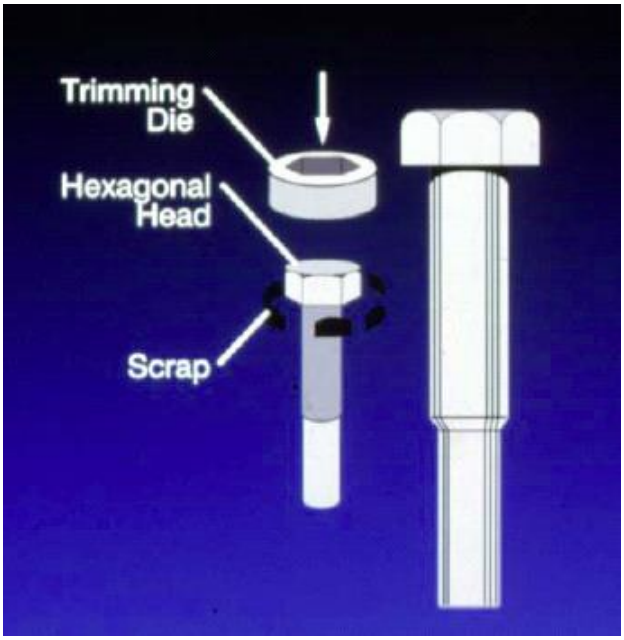


Figura 236

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Durante la operación de moldeado de la cabeza, el flujo de la textura se mueve paralelo a la superficie del filete debajo de la cabeza como se muestra en esta diapositiva.

Aunque el filete usualmente es terminado por la operación de martillado, algunas veces es laminado para mejorar su resistencia a las grietas debidas a los esfuerzos de comprensión superficial inducidos.

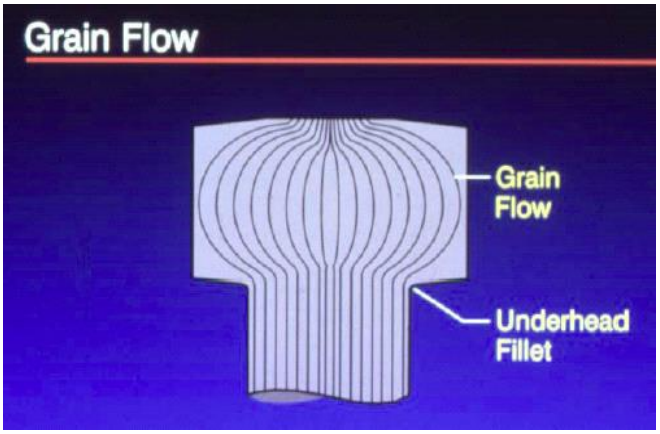


Figura 237

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

El próximo paso es la operación de punteado. Aquí se corta un bisel al final de la sección roscada.

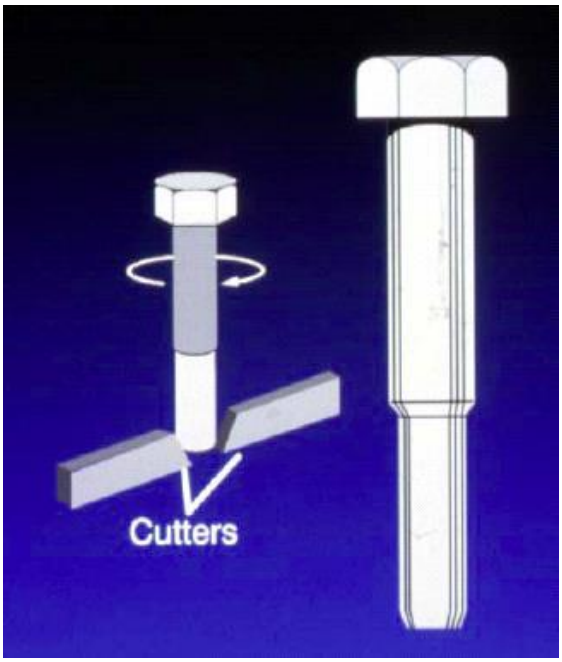


Figura 238

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

La espiga del perno generalmente se deja en la forma que ha sido moldeada. Sin embargo, a veces se la fresa a diámetro y forma finales para algunas aplicaciones especiales (como pernos de bielas) donde se necesitan tolerancias, ajustes y eliminación de escamas de laminado para reducir concentraciones de esfuerzos. Los

pernos de bielas a menudo también son moleteados para que las caras de la unión asienten bien.

Luego el perno es endurecido para darle alta resistencia a la tracción. Según el diseño, el endurecimiento se hace antes o después de formar las rocas.

Las tuercas generalmente son un poco más blandas que los pernos (aproximadamente 5 puntos RC), para que las roscas de la tuerca "cedan" o "fluyan" ligeramente y se amolden mejor a las roscas del perno. Esta característica de amoldamiento causa una transferencia más uniforme de la carga entre las roscas del perno y la tuerca.

Las roscas se pueden laminar gruesas o finas utilizando matrices fijas o móviles o pueden ser cortadas por mecanizado. Las roscas de los pernos son generalmente laminadas en lugar de cortadas.

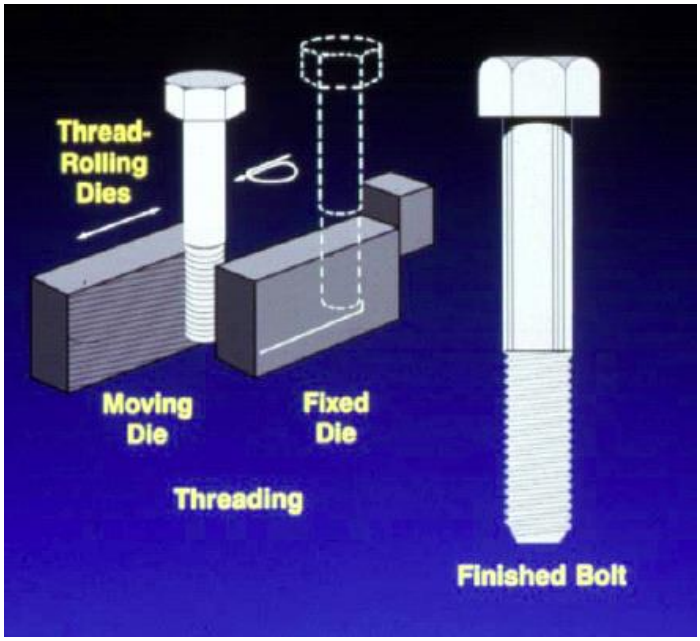


Figura 239

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

El proceso de laminación moldea roscas lisas y filetes de raíz de rosca con menos concentradores de esfuerzos. El laminado también mueve el flujo de la textura granular paralelo a las superficies roscadas y produce esfuerzos de compresión en las raíces de las roscas, mejorando la resistencia al agrietamiento por fatiga.

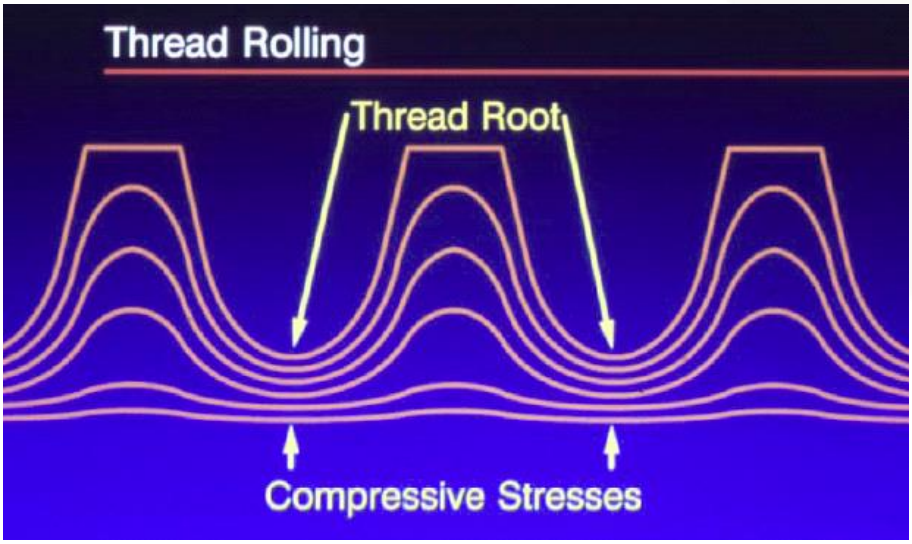


Figura 240

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Esta diapositiva muestra la apariencia real de un perno en las diferentes fases de moldeado, comenzando con la pieza bruta a la izquierda y acabando con el perno terminado a la derecha.

Figura 241

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Cada unión en los equipos está diseñada para usar un perno de dureza y resistencia a la tensión específicas, dependiendo de las cargas esperadas. Por eso es importante usar el perno diseñado para una unión en particular como se identifica en el catálogo de repuestos. Si no se obra en esta forma, podría ocurrir una sobrecarga del perno y una falla imprevista.

Para obtener un buen rendimiento de los pernos nuevos o usados, se debe prestar cuidadosa atención a la selección, manejo, inspección e instalación de los mismos.

Zona critica de un perno

Antes de la instalación, los pernos, tuercas y superficies de sujeción deben ser inspeccionados y preparados para armar las piezas que forman la unión. Las zonas críticas son:

- El filete debajo de la cabeza. Inspeccione para ver si está liso, si hay oxidación, grietas, muescas, ranuras etc.
- Las caras de la arandela para tuerca y perno. Examine para ver si hay corrosión debido a desportillamiento por rozadura, si están planas, si hay rebabas o cualquier condición que pueda causar concentraciones de esfuerzos o mal asentamiento del perno o de la tuerca.
- La espiga. Ver si está recta y que no tenga desgaste, oxidación, picaduras, grietas o cualquier condición que pueda causar esfuerzos adicionales.
- Roscas de tuerca y perno. Vea que no estén oxidadas, agrietadas, deformadas, con hilos saltados o con cualquier otro daño físico.
- Superficies de sujeción de las piezas a ser unidas. Estas superficies deben estar limpias, sin daños y preparadas de acuerdo con el manual de servicio e instrucciones especiales.
- Los agujeros ciegos roscados deben estar limpios, y sin líquidos que puedan causar bloqueos hidráulicos cuando se instalen los pernos.

Efectos de torque en pernos

Los pernos deben estar apretados a los pares de torsión correctos para mantener las uniones bien ajustadas en condiciones de operación.

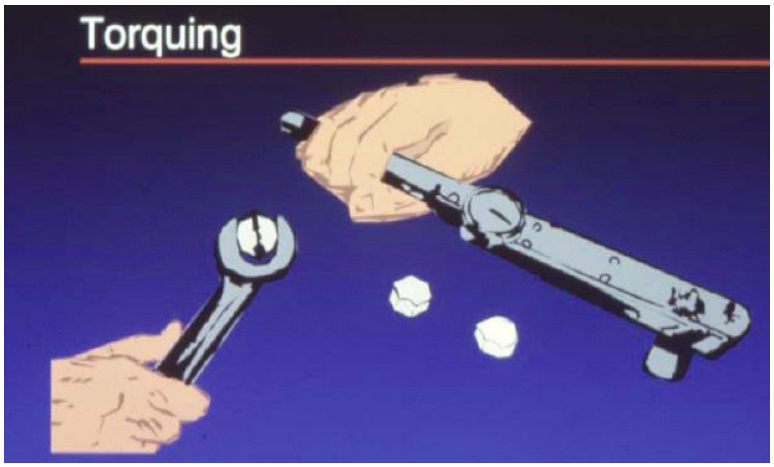


Figura 242

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Cuando los pernos están apretados a los pares de torsión correctos, la mayoría se estiran casi todo su límite elástico o máxima tensión y alargamiento posibles sin que el perno se deforme físicamente.

Un par de torsión menor puede dar pernos flojos. Un par de torsión mayor puede hacer que los pernos se estiren permanentemente. Por eso es importante seguir las instrucciones del manual de servicio y las instrucciones especiales para los pares de torsión específicos.

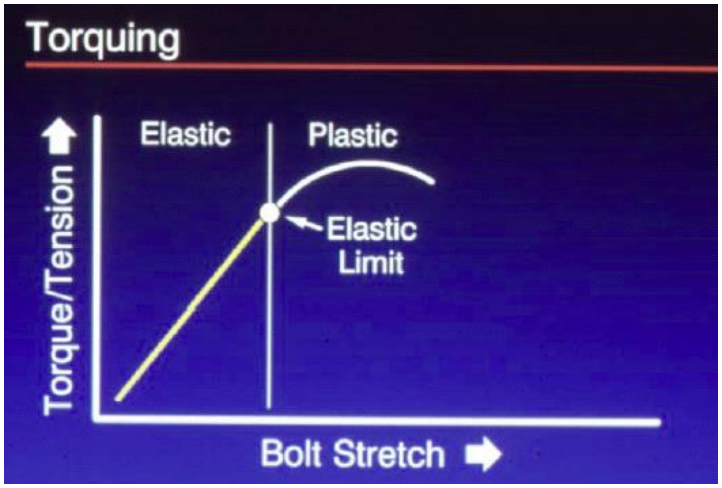


Figura 243

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Ahora observemos la apariencia de un perno en operación normal. Si las tuercas, pernos y superficies de sujeción han sido inspeccionados y preparados adecuadamente, y apretados al par de torsión correcto, no debiera haber movimiento relativo y poco o nada de desgaste entre el perno y las piezas unidas, dado el caso de que las cargas y temperaturas atmosféricas sean normales.

La cara de la arandela en la tuerca o debajo de la cabeza del perno (según que el perno o la tuerca giren durante la instalación), puede mostrar algún pulimiento o rayado leve, como se muestra en la diapositiva. Esta superficie, sin embargo, no debe estar desportillada por rozadura ni severamente ranurada.

Figura 244

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

La espiga del perno podría tener algo de pulimiento causado por las piezas unidas, particularmente en la cara de separación, como se muestra en este perno de biela. Sin embargo, esta superficie no debe estar severamente desgastada, acanalada, abollada, picada u oxidada.

Figura 245

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Un perno de uso normal también mostrará un leve pulimiento en las roscas que estaban engranadas con la tuerca o agujero roscado. Sin embargo, las roscas no deben tener ranuras profundas ni estar "aplastadas", lo que podría indicar una situación de sobrecarga o par de torsión excesivo.

Figura 246

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Como hemos visto antes, cuando la unión ha sido debidamente preparada y utilizada al par de torsión correcto, debe haber un mínimo desgaste y ninguna evidencia de movimiento de la misma.

Fallas más comunes causadas por condiciones ambientales

Algunas veces, sin embargo, condiciones anormales y ambientales causan daños o fallas al sujetador. Veamos algunos de los tipos de fallas más comunes y aprendamos a "pensar con los datos" para encontrar las posibles causas originales. Las fallas más comunes de los sujetadores causadas por condiciones ambientales anormales son:

- Fractura por fatiga
- Fractura dúctiles
- Corte por impacto (daño de impacto secundario)
- Desportillamiento por rozadura
- Corrosión debida a desportillamiento por rozadura

Como vimos en el módulo de fracturas, los indicios de fractura por fatiga son oleaje, superficies lisas, falta de deformación física y zonas final dúctil o quebradiza.

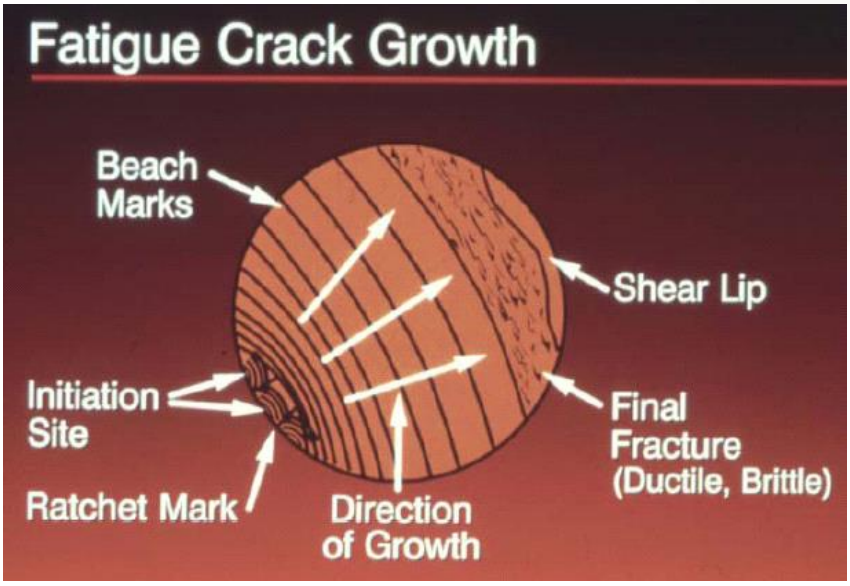


Figura 247

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

ractura por fatiga

Las fracturas por fatiga en los pernos pueden ser el resultado de tres condiciones generales:

- Concentradores anormales de esfuerzo con carga cíclica normal
- Carga cíclica mayor que la resistencia del sujetador a la fatiga
- Ambos al mismo tiempo, concentradores anormales de esfuerzos y sobrecarga cíclica.

Los concentradores anormales de esfuerzos como las picaduras, muescas, hendiduras, grietas de corrosión, etc., en un perno, particularmente en las zonas de alta carga de la rosca, espiga, filete debajo de la cabeza y cara de la arandela, pueden causar fallas por fatiga bajo cargas cíclicas normales. Lo importante en estos tipos de fallas, es determinar exactamente qué condición produjo este concentrador de esfuerzos.
Este perno ha fallado durante una carga cíclica normal y durante una carga cíclica normal y muestra los "indicios" típicos de fractura por fatiga. El oleaje comienza en un lado del perno y termina en el otro lado en una pequeña zona de fractura final dúctil. El labio cortado es el "indicativo" de la fractura final.

En este punto de nuestro examen debemos seguir el oleaje hasta el sitio de origen para estudiar esta zona más de cerca.

Figura 248

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

La vista ampliada revela una hendidura en el sitio de origen del oleaje. Estos nos indican que la hendidura existía cuando se instaló el perno y actuó como un concentrador de esfuerzos. ¿De dónde provino la hendidura y quién es el responsable de la falla?

Los pernos también pueden fallar por fatiga sin concentradores anormales de esfuerzos. Estas fallas resultan de:

- Sobrecarga periódica de una unión apretada correctamente.
- Carga normal con una junta floja, o,
- Carga normal con un perno debilitado o de clase que no es la apropiada (resistencia muy baja).

Las condiciones primera y tercera pueden producir grietas de fatiga debido a la sobrecarga periódica.

Estas grietas generalmente comienzan en las zonas mencionadas antes como de mayor esfuerzo del perno, es decir:

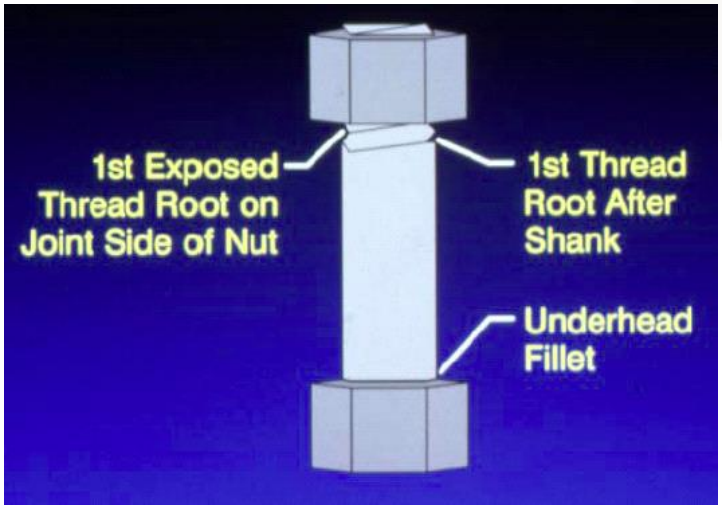


Figura 249

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

1) La raíz de la primera rosca expuesta en el lado de la tuerca o agujero roscado de la unión,

2) El filete debajo de la cabeza, o

3) La raíz de la primera rosca después de la espiga.

La cara de la fractura no mostrará en el sitio de origen un concentrador de esfuerzos que parezca anormal.

Este perno falló debido a sobrecarga cíclica. Note que no hay concentrador de esfuerzos que parezcan anormal en el sitio de origen (a la izquierda de la diapositiva) y que hay varias mellas en la raíz de la rosca indicando que aquí se aplicaron altos esfuerzos. La condición de sobrecarga inició una fractura por fatiga en la raíz de la rosca y se extendió transversalmente por el perno hasta que se produjo la fractura final dúctil (note el labio cortante).

Figura 250

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Para entender mejor cómo la condición numero 2 (carga normal con unión floja) puede causar grietas por fatiga, se requiere mayor conocimiento sobre cómo las cargas externas son soportadas por una unión con pernos y qué pasa si la unión se afloja.

Como mencionamos anteriormente, la aplicación del par de torsión produce cierta tensión en el perno, presente siempre, aun cuando la unión no esté bajo carga. Llamamos a esto "precarga" de la tensión inducida por el par de torsión. Al aplicar una carga externa que trata de separar la unión, la tensión en el perno aumenta ligeramente la tensión de precarga pero no tanto como la de la carga aplicada.

En otras palabras, la tensión en un perno al par de torsión correcto, aumenta apenas una porción de cualquier carga externa que esté tratando de separar la unión.

En la mayoría de las uniones, la porción de aumento en el perno no es más de 1/7 de la carga externa aplicada. En uniones con cargas altas como en las tapas de bielas, este aumento puede ser tanto como 1/4 de la carga externa. En una unión apretada, todas las fuerzas de corte y flexión son soportadas por las superficies de fuerzas de sujeción anteriormente mencionadas.

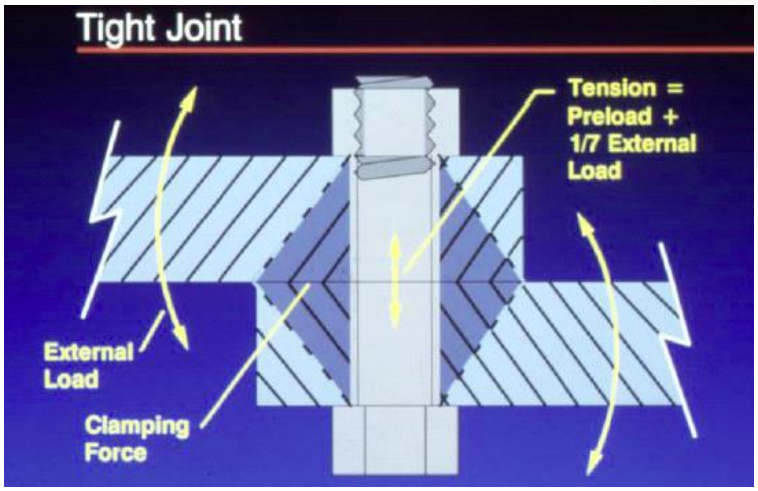


Figura 251

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Si un perno se afloja (por insuficiente par de torsión, relajamiento de la unión debido a residuos entre las caras de unión, material inadecuado de la empaquetadura, arandelas mal endurecidas, superficies de contacto rugosas o alabeadas, etc.), la fuerza de "precarga" y de sujeción se pierde y el perno debe soportar toda la carga externa.

Por lo tanto, la fractura por fatiga de un perno en buenas condiciones (pero flojo) puede ocurrir porque está soportando cargas cíclicas de 4 a 7 veces la normal. También, si un perno se afloja, las fuerzas de corte y flexión normalmente soportadas por las superficies de fuerza de sujeción se transfieren también al perno.

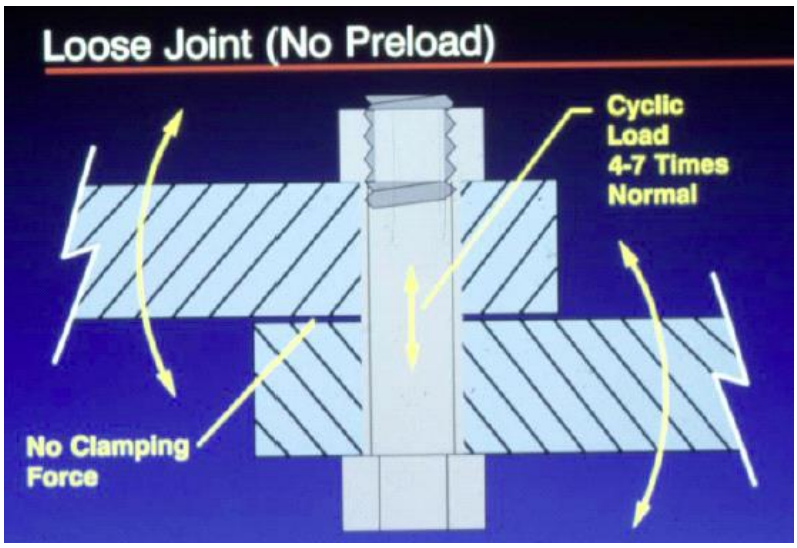


Figura 252

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Los pernos que sujetaban el volante a este cigüeñal estaban flojos.

Figura 253

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Una inspección más de cerca de la brida del cigüeñal, muestra desportillamiento por rozadura causado por el movimiento entre el cigüeñal y el volante.

Figura 254

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Los agujeros para pernos del volante también están deformados indicando el movimiento relativo entre el volante y la brida del cigüeñal.

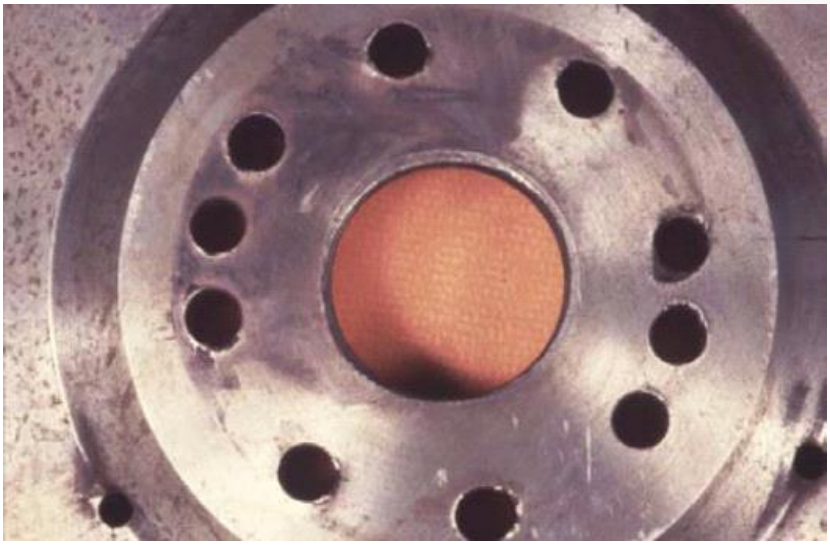


Figura 255

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

El otro lado del volante tiene depresiones alrededor de los agujeros para pernos, donde las caras de la arandela en la cabeza de los pernos causaban deportillamiento por rozadura.

Esta es una vista ampliada de uno de los agujeros para pernos en el volante que muestra la superficie desportillada por roce producido por la arandela del perno.

Figura 256

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Estos son pernos típicos resultantes de la falla. El perno a la izquierda superior de la diapositiva está demasiado dañado para poder identificar las causas de la falla. El perno en la parte superior derecha tuvo falla por fatiga (note el oleaje). El perno de

abajo a la izquierda tiene fracturas en dos lugares, en la cara de separación del volante con el cigüeñal y en la zona del filete debajo de la cabeza. La cabeza abajo a la derecha es del perno a la izquierda. También muestra las señales de fatiga (oleaje de izquierda a derecha).

Figura 257

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Las caras de las fracturas de la mayoría de los fragmentos de pernos que se rompieron en la brida del cigüeñal se veían como éste.

Note que hay dos grupos de oleaje (uno que comienza a la izquierda y otro a la derecha) y que se extienden hasta la fractura dúctil final en el centro (indicios de fatiga por flexión inversa)

Note también que la fractura comienza en la raíz de la primera rosca expuesta en el lado de unión del agujero roscado del cigüeñal.

Los datos de este caso indican, todos, como causa original de la falla, pernos flojos (quizás por insuficiente par de torsión). Los pernos flojos produjeron en ellos mismos esfuerzos cíclicos de corte y flexión anormales, sobre la sobrecarga cíclica que ya soportaban por la tensión de las fuerzas tratando de separar el volante del cigüeñal (cerca de 7 veces lo normal).

Lo que debemos preguntarnos aquí es “¿Quién apretó los pernos y cómo se aflojaron?”.

Figura 258

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Fracturas dúctiles

Los pernos pueden experimentar fracturas dúctiles causadas por sobrecarga súbita durante un ciclo de carga.

Existen tres condiciones generales que producen estas fracturas dúctiles:

1) Concentración de esfuerzos elevados

2) Sobrecarga pesada

3) Perno débil o inadecuado

Un concentrador de esfuerzos (hendidura o muesca) tan honda que reduzca considerablemente la zona transversal del perno puede hacer que la parte restante del perno de sobrecargue y tenga una fractura dúctil.

Esto puede ocurrir en condiciones de carga normales de la unión o cuando se ésta apretando el perno. Nuevamente, debemos buscar la razón del aumento de esfuerzo para determinar la causa original de la falla.

Tal vez la razón más común de las fracturas dúctiles de pernos sea la sobrecarga sin concentrador anormal de esfuerzos. Esta condición puede ocurrir como resultado de lo siguiente:

1) Una carga externa pesada anormal está siendo aplicada al componente donde está instalado el perno, o

2) Otra pieza fallada está ejerciendo una gran sobrecarga en un perno adyacente o remanente.

Este perno estaba sobrecargado, está físicamente deformado y en vía de fallar.

Figura 259

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Este perno de biela es un ejemplo de fractura dúctil causada por sobrecarga.

Note la reducción del espesor, textura áspera y leñosa, labios cortantes y color oscuro en la cara de la fractura, todos son “indicios” de una fractura dúctil.

Lo importante que debemos recordar sobre fracturas dúctiles es que son casi siempre el resultado de alguna condición ajena a la calidad del perno y debemos seguir investigando para obtener más datos que nos lleven a la causa original de la falla.

Figura 260

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Otra forma de ejercer gran sobrecarga en un perno es con excesivo par de torsión. Note la deformación física (reducción del espesor) de la sección roscada adyacente a la

fractura de este perno. La mayoría de estas fracturas se dan en las primeras roscas expuestas en el lado de la unión donde está la tuerca o agujero roscado.

Figura 261

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Una inspección más de cerca de la sección roscada revela una pequeña zona de fatiga y una fractura dúctil grande. El perno se debilitó por sobrecarga y alargamiento físico.
La carga cíclica produjo entonces una pequeña hendidura de fatiga lo cual debilito el perno aún más, de forma que la carga normal causo la fractura dúctil final.

Observando las roscas hacia abajo, notará que están brillosas donde se ha instalado la tuerca. Estas roscas están rayadas profundamente y han sido “aplastadas”, indicando la presencia de altos esfuerzos anormales entre las roscas de la tuerca y del perno al aplicar excesivo par de torsión.

Figura 262

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Si se usa un perno débil o inadecuado, las cargas normales pueden sobrecargarlos. Este perno muestra varias señales interesantes de debilitamiento. Note la extensa pérdida de espesor y el color oscuro de los depósitos de óxido. Estas son indicaciones de que el perno ha estado a temperatura sobres los 816 ºC (1500º F), lo que ha reducido severamente su resistencia, causando su falla bajo carga normal. La alta temperatura fue generada por la falla de un cojinete de biela.

Nota: Es fácil llegar a la idea preconcebida de que los pernos han fallado debido a la alta temperatura por que éstos se ven negros. Debemos recordar que muchos pernos son normalmente negros debido al tratamiento térmico. Por lo tanto, primero debemos examinar las caras de la fractura antes de formar una opinión sobre la causa de la falla.

Figura 263

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Algunas veces vemos en una falla pernos que han sido partidos o aplastados por un objeto que se mueve con gran fuerza. Estos son daños causados y no se deben confundir con las fracturas por fatiga.

Estos pernos, aunque podrían tener una apariencia relativamente lisa y brillante (sedosa), no tendrán oleaje pero mostraran algún daño por impacto donde la pieza recibió el golpe. A menudo hay descolocación causada por la alta temperatura generada por el calor de la fricción durante el daño por impacto.

Ejercicio de practica 1

Ahora repasemos lo que hemos aprendido hasta aquí, observando tres pernos y analizando los indicios en cada uno de ellos para determinar el tipo de fractura o daños que han sufrido. ¿Qué tipo de fractura o daño tiene cada uno de ellos?

Perno :	Indicio	: Tipo de fractura o daño
Izquierdo	:	
Centro	:	
Derecha	:	

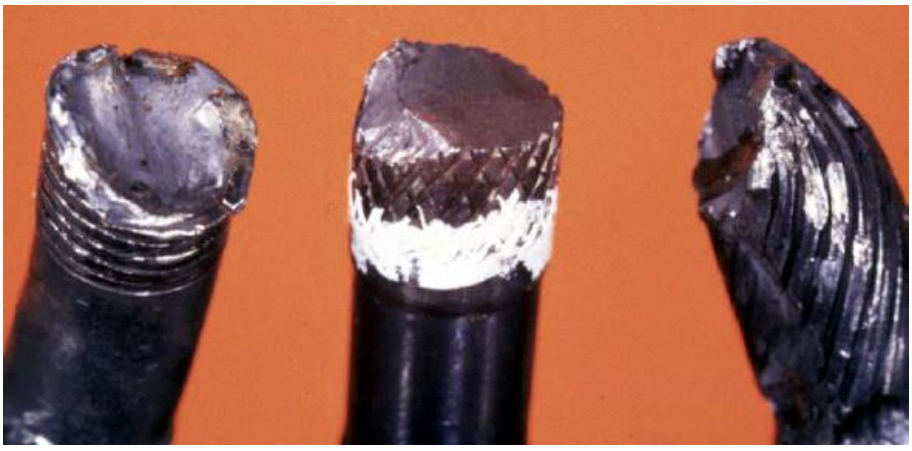


Figura 264

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

¿Cuáles piensa usted serían las causas originales de la falla de cada uno de estos perno?

Desportillamiento por rozadura

El desportillamiento por rozadura nos indica que la unión se movía cuando se aplicaron las cargas. El movimiento de la unión puede ser el resultado de insuficiente o excesivo par de torsión, temperatura excesiva del perno, sobrecarga cíclica o cualquiera otra causa por la cual el perno no tiene la suficiente tensión para mantener apretada la unión.

Este perno muestra desportillamiento por rozadura en la cara de la arandela debajo de la cabeza. Cuando se observa un desgaste de este tipo, debemos concluir que la unión

estaba floja o cíclicamente sobrecargada por un periodo de tiempo significativo antes del desarmado.

Figura 265

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Las uniones flojas también pueden causar corrosión de los pernos debida a desportillamiento por rozadura.

Durante una reparación, se descubrió que este perno tenía corrosión debida a desportillamiento por rozadura cerca de las caras de separación de la unión, lo que condujo a picadura (un concentrador de esfuerzos). Si se reutiliza este perno, las picaduras pueden conducir a fractura del perno por fatiga.

Figura 266

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

3.4 Causas más comunes de fallas en pernos

La calidad de los pernos se controla muy de cerca según especificaciones rigurosas. Como resultado, pernos defectuosos son rara vez causa de problema. Ocasionalmente, sin embargo, problemas de fabricación o de materiales podrían causar fallas de pernos. Las más comunes radican en las áreas siguientes:

1) Material

2) Moldeado

3) Endurecimiento

4) Roscado

Como todos los aceros laminados, los pernos pueden tener costura, cavidades tubulares, imperfecciones, etc. Como hemos visto en el módulo de metalurgia, estas impurezas rara vez se las ve en las piezas y generalmente no causan problema, a menos que sean grandes y/o estén en zonas de alto esfuerzo.

Este perno tiene una costura que se formó durante el laminado en caliente de la varilla de acero de la cual se hizo el perno. Costuras como ésta(a lo largo del perno) no son perjudicadas a no ser que sean hondas o estén abiertas.

Figura 267

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Durante las operaciones de moldeado, también es posible crear concentradores de esfuerzos indeseables, como solapas, pliegues y desgarres.

Problemas como éstos son muy raros, pero ocurren ocasionalmente.

Otro concentrador de esfuerzo se forma a veces cuando la cabeza es moldeada en la forma conocida de “reventón”. Este reventón resultó de una costura de laminado que se

abrió debido a altos esfuerzos de tensión y flujo de metal durante la operación de moldeado de la cabeza.

Figura 268

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Esta vista ampliada muestra las superficies internas dúctiles, ásperas y leñosas producidas por el reventón.

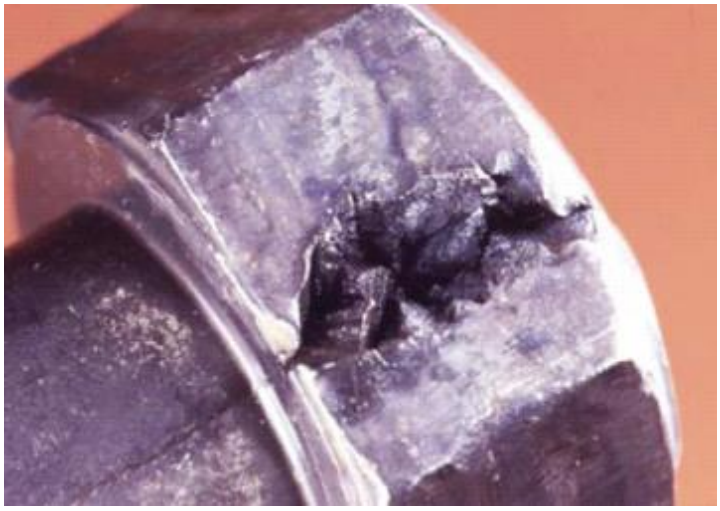


Figura 269

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

La zona del filete debajo de la cabeza, cara de la arandela y espiga del perno, también muestra la costura que fue la causa original de este reventón.

Figura 270

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Ocasionalmente, un perno puede ser demasiado duro (ya sea por mal endurecimiento o demasiado contenido de carbono).

En estas condiciones, una combinación de alto esfuerzo y de ambiente de humedad oxidante pueden formar un agujero en la superficie y romper la difusión intergranular del acero, causando una grieta de oxidación por esfuerzos, con apariencia quebradiza que se forma durante varias horas.

Este tipo de grieta es una excepción a la regla general de que “las grietas quebradizas se forman solamente en una porción del ciclo de carga”. En este caso, lo que abre la grieta es la corrosión combinada con el esfuerzo de tensión que rompe la difusión intergranular y no una carga de impacto súbita.

El agrietamiento por corrosión combinado con esfuerzo es también en ejemplo de una fractura quebradiza que es “causa de falla “y no “resultado de falla”.

Este perno de cadena ha experimentado agrietamiento de corrosión combinado con esfuerzo, que comenzó en la raíz de la rosca. La corrosión avanzó en trayecto semicircular transversal al perno, hasta que la sección transversal remanente quedó sobrecargada con la tensión normal del par de torsión especificado del perno. El perno, entonces, sufrió una fractura dúctil final.

En este caso, la causa original del problema no fue una condición operativa, sino la metalurgia inapropiada del perno (demasiado dura y mucho carbono). Cuando se disminuyeron los niveles de carbono y dureza, las fallas cesaron.

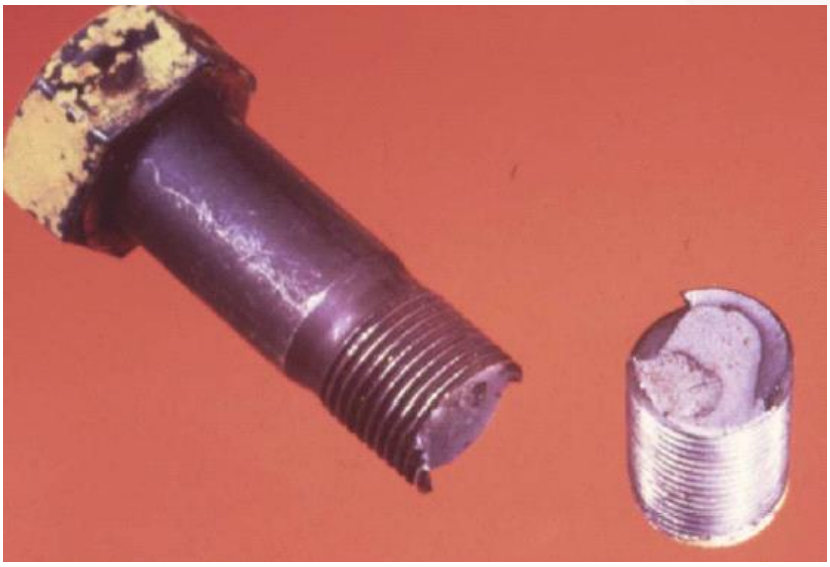


Figura 271

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)
Este perno de caja de diferencial falló de manera similar.

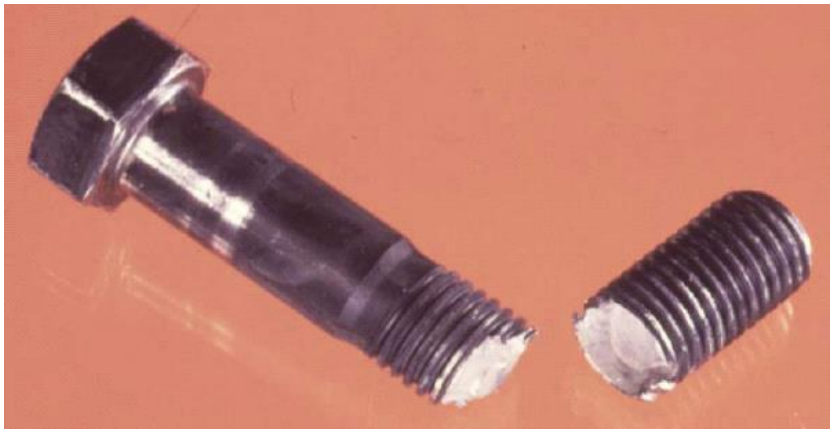


Figura 272

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Note en esta vista ampliada, el sitio donde se origina la grieta (abajo, a la izquierda) y la cara de la fractura quebradizas con espiguillas (indicios) apuntando el sitio de origen.

Figura 273

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

En esta vista con mayor ampliación de la raíz de la rosca, podemos ver el agujero real y la zona oscura pequeña del sitio donde la corrosión se ha introducido en la difusión ínter granular del acero (abajo, al centro de la diapositiva). También podemos ver la apariencia brillante y cristalina de la cara de la fractura, indicios de una fractura quebradiza.

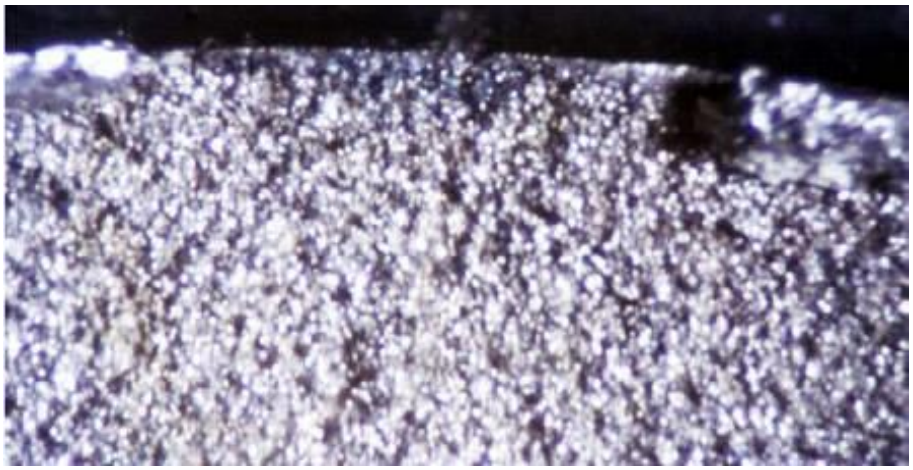


Figura 274

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Esta es una vista aún más ampliada del agujero. Nuevamente, esta falla es el resultado de un problema de tratamiento térmico y material del perno (demasiado duro/ mucho carbono).

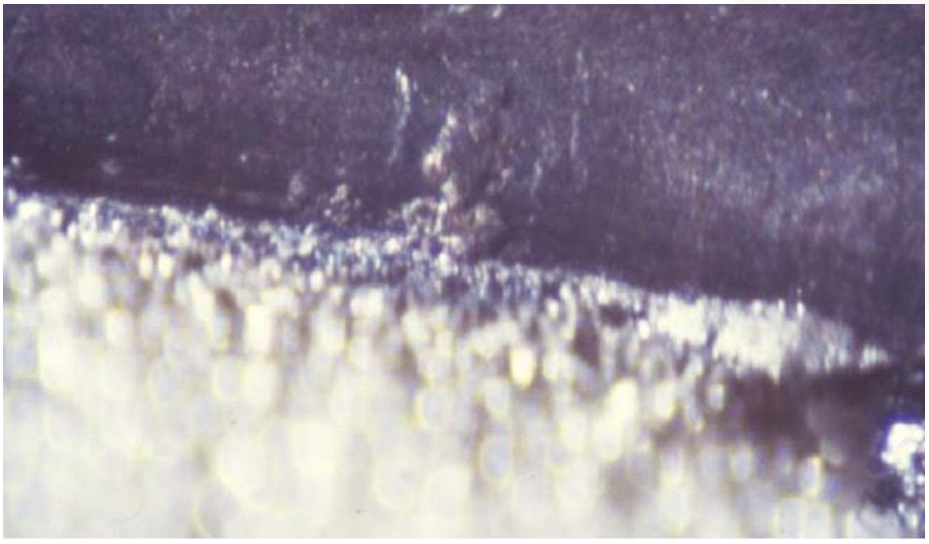


Figura 275

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Los problemas de endurecimiento también pueden causar otros tipos de fallas. Este perno ha fallado en el filete debajo de la cabeza. ¿Qué ha causado la falla?

Esta vista ampliada nos da la respuesta. ¿Puede usted ver algún indicio de la causa original?

Note la diferencia de apariencia en varias zonas de la cara de la fractura.
Hay una franja angosta de superficies más oscuras y más cristalinas en la parte superior (alrededor de la circunferencia) de la cara de la fractura, cuando se la compara con las superficies más hacia el interior de la misma. Esta franja oscura y angosta pasa por toda la circunferencia del perno. Es una grieta de enfriamiento formada durante el proceso de enfriamiento después del tratamiento térmico.

Esta grieta de enfriamiento creó un concentrador de esfuerzos extremadamente alto en una de las zonas de la carga más elevada del perno, causando una fractura dúctil la primera vez que se aplicó carga suficiente.

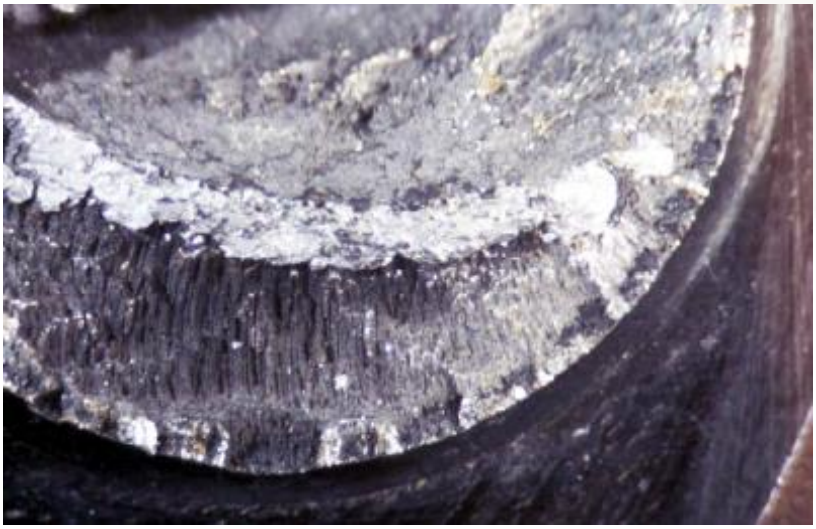


Figura 276

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Problemas de moldeado de las roscas

Hablemos ahora de los problemas de moldeado de las roscas. Debe tenerse mucho cuidado en el cortado o laminado de las roscas del perno, para evitar cualquier condición que pueda formar esquinas anormalmente afiladas, grietas, rebadas, solapas u otros concentradores anormales de esfuerzo en las roscas(particularmente en la raíces de las roscas) , ya que éstos podrían conducir a fracturas por fatiga.

En raros casos, las irregularidades profundas o severas podrían disminuir la resistencia del perno hasta el punto en que las cargas normales produjeran sobrecarga y fracturas dúctiles. Más a menudo, sin embargo, estas irregularidades causan grietas por fatiga.

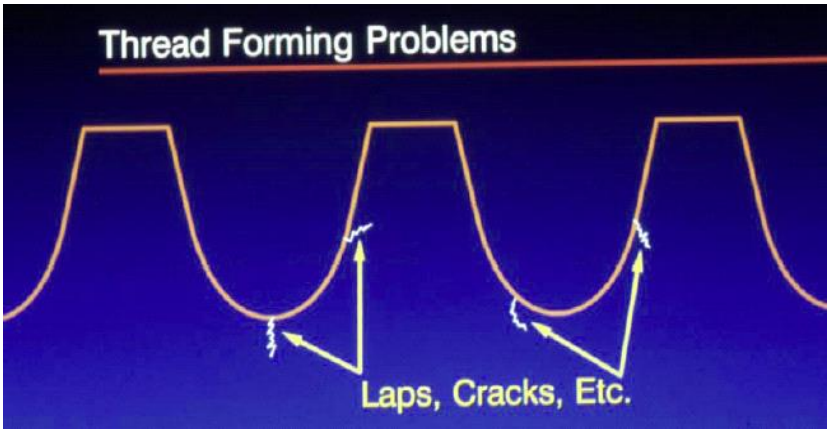


Figura 277

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Este perno falló debido a una grieta que había en el vértice agudo de una raíz de rosca cortada. La grieta creó un concentrador de esfuerzos que originó una fractura por fatiga en aproximadamente 120º de la circunferencia de la rosca y avanzó hacia adentro hasta

que medio perno estaba agrietado. En este punto, el material remanente del perno estaba sobrecargado y ocurrió la fractura dúctil final.

Figura 278

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Esta vista ampliada muestra el agrietamiento que había en la raíz de rosca de algunas de las roscas adyacentes que no fallaron. Note el efecto severo de la muesca formada que concentró el esfuerzo en la raíz de rosca hasta ocho veces lo normal.

Figura 279

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Tuercas y agujeros roscados rara vez dan lugar a fallas. Esto se debe a que, aunque las tuercas son por lo general un poco más blandas que los pernos correspondientes, las cargas gravitan en forma diferente y las tuercas tratadas térmicamente normalmente

están diseñadas con un enganche de rosca tal que el perno falla en tensión antes que las roscas es salten.

Si sus roscas se saltan, por lo general se debe al uso de sujetadores inadecuados, de baja calidad, insuficiente enganche de rosca, roscado transversal durante la instalación, suciedad en las roscas o error en el tratamiento térmico.

Las últimas roscas saltadas de esta tuerca son el resultado de enganche insuficiente de las roscas después que la tuerca retrocedió durante la operación.

Figura 280

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Ejercicio de practica 2.
Ahora veamos algunos pernos fallados para saber si podemos identificar los tipos de fracturas y si éstas son causas o resultado.

¿Cuáles de estas fracturas son causas y cuáles son resultado de una falla? ¿Qué tipo de fractura tiene cada uno?

Figura 281

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Esta es una vista más detallada de los pernos. Ahora, ¿Cuáles son causas y cuáles son resultados y que tipos de fractura muestran?

Respuestas:

a) Los cuatros pernos de la derecha muestran caras de fractura plana, fracturas por fatiga, causas originales.

b) Los tres pernos a la izquierda tienen color oscuro, son ásperos, leñosos y de menos espesor, fracturas dúctiles y resultados.

c) El perno de abajo no es de menor espesor, la cara de fractura no es recta a través del diámetro del perno, la cara de la fractura no se ve aquí pero parece sedosa cortada por impacto resultado.

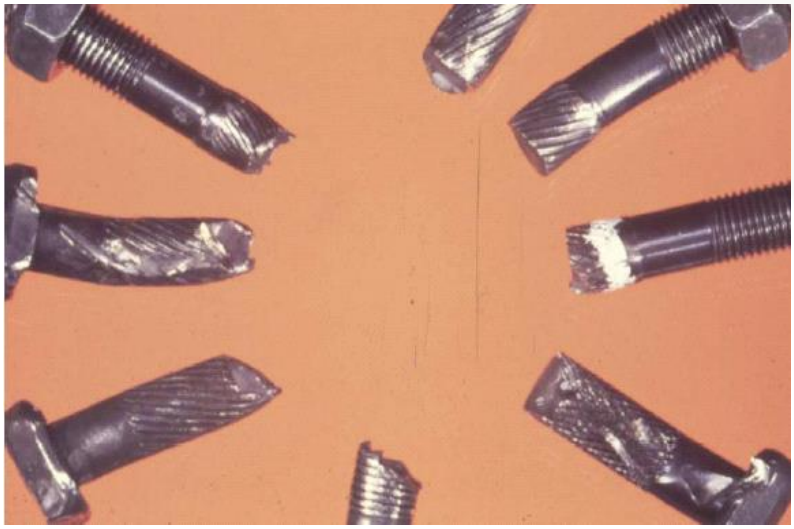


Figura 282

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Ahora, ¿Qué tipo de fractura es ésta?

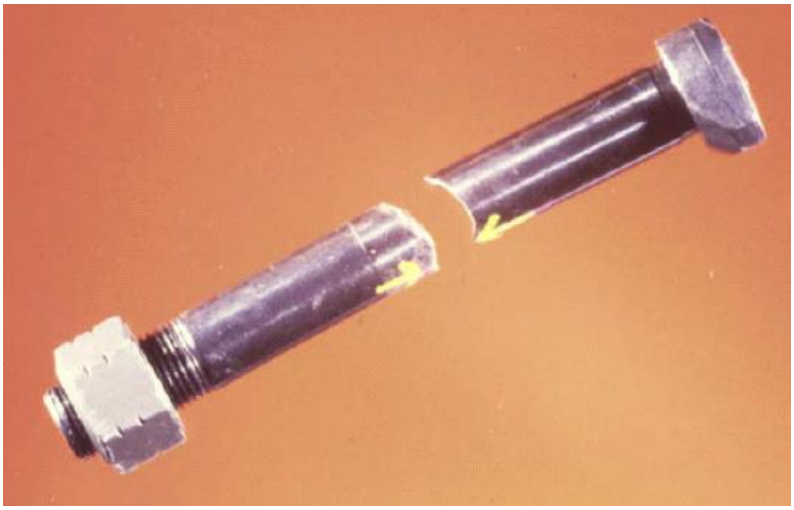


Figura 283

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Note el sitio de origen de los indicios, oleaje y fractura dúctil final. ¿Cuál es la causa original de esta falla? (note la corrosión por desportillamiento visible en la espiga, debajo de la cara de fractura. Esta misma condición existió en el sitio de origen donde causó un agujero (concentrador de esfuerzo) y que al final resultó en fractura por fatiga).

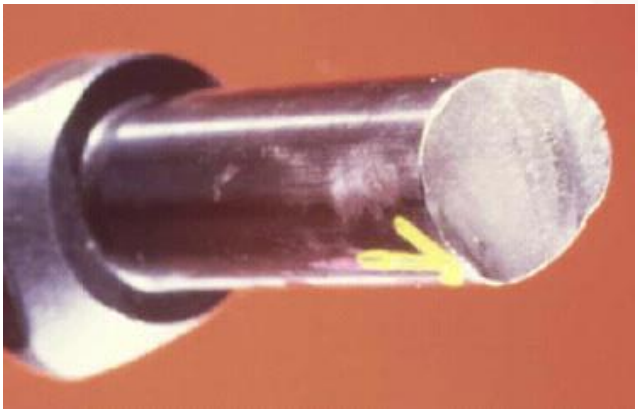


Figura 284

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Esto concluye nuestro módulo de sujetadores de rosca. En este módulo aprendimos que los sujetadores proporcionan fuerza de sujeción y transfieren carga. Estos son cuidadosamente fabricados, pero pueden sufrir abusos por instalación o condiciones adversas.

La calidad de los pernos laminados rara vez es la causa de una falla. Por consiguiente, debemos tener cuidado al analizar las fallas de sujetadores para determinar la correcta causa original.

Después de haber reunido los datos y determinado la causa debemos completar los pasos 6,7 y 8 (de los ocho pasos Aplicables al Análisis de Fallas). Estos pasos no ayudan a "obtener la recompensa" poniéndonos en contacto con el miembro del equipo responsable de la falla, haciendo las reparaciones según instrucciones de la parte responsable y continuando en contacto con el cliente para asegurar su satisfacción.
Veamos ahora algunos ejemplos reales de fallas de pernos para ver si podemos determinar el tipo de fractura o la condición que existe y su causa original más probable. (Taller).

3.5 Análisis de falla aplicada a engranajes.

Engranajes
Bienvenidos a la continuación del seminario de Análisis de falla. Esta sección trata del análisis de falla de engranaje. Se considera que un engranaje ha fallado cuando no puede cumplir más la función para la que se diseñó.

En esta presentación revisaremos la función de los engranajes. Su estructura, manufactura, operación (incluyendo cargas, desgaste normal, desgaste anormal, y fracturas), y los posibles problemas con los engranajes en sí.

Estaremos utilizando los ocho pasos básicos del análisis de falla, y debemos recordar aplicar los principios de administración, desgaste, fracturas y examen visual cubiertos en las presentaciones anteriores. Estar familiarizado con estas áreas nos preparará

para efectuar un trabajo de calidad cuando analicemos fallas del engranaje. Especialmente, debemos recordar obtener nuestra recompensa al completar los pasos 6,7 y 8.

Conforme obtenemos evidencia, debemos identificar cuidadosamente y seguir las huellas del camino. Las que nos guiarán a nuestro destino: la causa raíz.
Las causas raíz de las fallas de engranaje se encuentran por lo general en su aplicación, operación y mantenimiento. La siguiente causa raíz más probable en su instalación. Seguido por su manufactura y luego por su diseño. Observe que los problemas de diseño y manufactura representan una porción muy pequeña dentro del universo de fallas de engranajes. Nuestro trabajo es identificar la causa raíz y tomar las acciones correctivas al primer intento.

Los engranajes cumplen cinco funciones básicas:
1) Transmitir una fuerza
2) Cambiar la dirección y/o el ángulo de movimiento
3) Cambiar la velocidad de rotación
4) Cambiar la magnitud del par
5) Transmitir fuera a otra línea de eje.

Aquellos que aplican fuerzas son llamados engranajes de mando o conductor, mientras los que reciben la fuerza son llamados engranajes conducidos o guiados. La relación de engranaje siempre es definida como la comparación del número de revoluciones de engranaje de mando con las del engranaje conducido. En este caso la relación de engranaje es de 1:2 (cada revolución de engranaje de mando con 24 dientes producirá dos giros del engranaje producido con 12 dientes). En los trenes del engranaje de mando directo, el engranaje conducido invierte el sentido de rotación. Las velocidades de rotación se pueden cambiar, cambiando el número de dientes y los diámetros de los engranajes.

Figura 285

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Cuando el engranaje de mando es más grande que el engranaje conducido, el conducido tendrá la velocidad de rotación más grande pero su capacidad de torque será menor que el de mando. Cuando el engranaje de mando es más pequeño que el engranaje conducido, el conducido girara a menor velocidad pero su capacidad de

torque será mayor que el de mando. En los engranajes de mando directo, solo cuando se invierta el sentido de rotación, se encontraran esfuerzos de flexión alternativa. Debido a que los engranajes pequeños giran más veces que los grandes y que por lo general soportan mayores esfuerzos que los grandes, se les diseña y construye de forma más resistente

Figura 286

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Cuando se requiere conservar el sentido de rotación, o cuando los engranajes conducidos están lejos de los mando, se utilizan los engranajes locos intermedios. El tamaño de los engranajes locos nos afecta la velocidad de rotación ni la capacidad de torque de los engranajes de mando ni de los conducidos. Durante cada revolución los dientes de los engranajes locos son sometidos a un ciclo completo de flexión inversa en cada revolución.

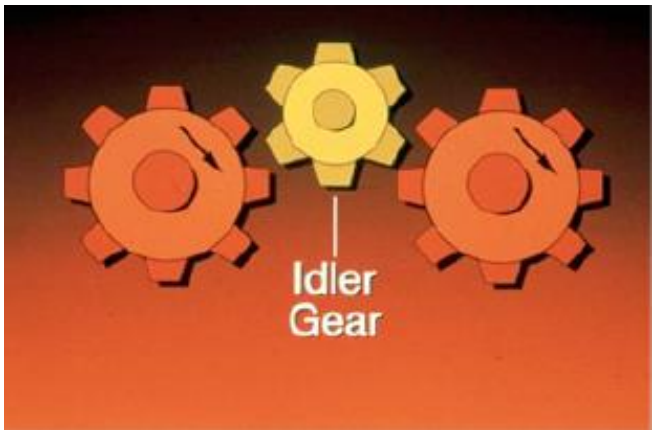


Figura 287

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

A pesar que la mayoría de los engranajes son tallados sobres ruedas de base forjadas, también pueden ser fundidos, prensados a base de material sinterizado, cortados sobre barras de acero, o terminamos por forja (también llamado conformado por forja).Los engranajes conformados por forja tienen las líneas de flujo paralelas a las superficies. Debido a que las grietas no se pueden propagar fácilmente a través del flujo

granular, esta disposición ayuda a prevenir posibles fracturas por fatiga en los concentradores de tensión tales como curvas, canales, filetes, etc. Los engranajes tallados sobre las ruedas base forjadas tienen un flujo granular de lado a lado, y también son muy resistentes y durables.

Figura 288

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Los engranajes elaborados de acero colado, fierro fundido o material sinterizado, se usan por lo general en accesorios, sistemas hidráulicos, o en otras aplicaciones de menor potencia.

Tipos de engranajes

Los engranajes pueden ser por su diseño de dientes rectos, cónicos, helicoidales o sin-fin. Los dientes en los engranajes rectos están uniformemente espaciados y son paralelos a los agujeros o ejes. Los dientes hacen un contacto lineal y paralelo a los ejes. La ubicación de los dientes puede ser interna o externa. Teóricamente cuando están correctamente alineados, no existen fuerzas axiales

Figura 289

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Los engranajes rectos se usan comúnmente para transmitir fuerzas entre ejes paralelos. En muchos de los engranajes rectos producidos actualmente, un diente por vez acarrea la mayor parte de la carga. Generalmente, cuando la fuerza se transfiere de un diente al siguiente, se produce un pequeño “salto” haciendo algo de ruido, durante su operación. Los ingenieros de diseño están trabajando en un nuevo tipo de engranajes rectos de alta relación de contacto, los cuales, reparten la carga entre varios dientes y otorgan una operación más silenciosa.

Los engranajes cónicos de dientes rectos tienen los dientes espaciados uniformemente en forma de cuña. El lado más grande y grueso del diente es llamado talón, mientras que el lado más pequeño es llamado punta. Estos engranajes son similares a los de dientes rectos y económico producirlos.

Figura 290

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Los engranajes cónicos de dientes rectos se utilizan para transmitir fuerza entre ejes que se encuentran a un ángulo. Generalmente, un solo diente soporta la mayor parte de la carga.

Figura 291

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Otros tipos de diseño de engranajes cónicos incluyen los hipoidales, en espiral y helicoidales. Esto se diseña de tal forma que dos o más dientes se comparten la carga. Pero, los dientes no serán rectos, y su angularidad hará que el contacto por deslizamiento se incremente debido a esta angularidad y hace necesario el uso de cojinetes de empuje. Estos engranajes son más silenciosos que los anteriores.

Figura 292

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Engranajes helicoidales

Los engranajes helicoidales tienen dientes que describen la forma de una hélice o curvas en espiral, y se usan ya sea en ejes paralelos o que se cruzan. Debido a sus dientes angulados se produce una fuerza axial, haciendo necesario el uso de cojinetes de empuje. Cuando el ángulo de los dientes es amplio varios dientes soportan cargas al mismo tiempo, cuando los ejes son paralelos se produce una línea de contacto vertical, mientras que con ejes cruzados se produce solo un punto de contacto, reduciendo la capacidad del diente para soportar carga. Por lo tanto, al tener más dientes en contacto para soportar la carga, la capacidad total del engranaje no se incrementa. El salto de los dientes es mínimo y su operación es silenciosa.

Figura 293

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Los engranajes helicoidales dobles o de doble hélice, se utiliza entre ejes paralelos. Debido a que el ángulo de los dientes se invierte dando la forma de flechas, las fuerzas axiales se equilibran y no es necesario utilizar cojinetes de empuje. Dos o más dientes soportan la carga en todo momento y su operación es silenciosa.

Figura 294

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Por lo general se utilizan los engranajes sinfín entre ejes que se cruzan. Tienen poca capacidad de soportar carga y producen fuerzas axiales. Pero son útiles en aplicaciones de reducción de velocidad y aumento de torque.

Figura 295

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Los dientes pueden ser ubicados en el interior del engranaje, permitiendo reducción de velocidad y aumento de torque en un espacio compacto. El engranaje central mostrado aquí es llamado engranaje solar, mientras que los más pequeños que giran en su rededor son llamados planetarios o satélites. El engranaje exterior, con dientes interiores es llamado engranaje anular.

Figura 296

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Cuando los dientes son colocados a lo largo de una línea, se le llama engranaje de cremallera o simplemente cremallera. Convierte en forma directa el movimiento rotacional en lineal. Los sistemas de dirección tienen por lo general cremalleras.

Nomenclatura de los dientes

Figura 297

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Independientemente del tipo de diente que se trate, su nomenclatura es similar. La parte superior del diente es llamada punta. El fondo del diente es llamado raíz. El punto del diente en el cual solo se produce contacto de rodadura, es llamado línea del paso del diente, y el círculo que une las líneas del paso es llamado circulo de paso. La porción del diente ubicada encima de la línea de paso se llama addendum (Cabeza), y la porción por debajo de la línea de paso dedendum (Pie). Tanto en el addendum como en el dedendum se produce contacto de deslizamiento y de rodadura combinados. El radio del filete entre los dientes es llamado con frecuencia filete de la raíz. Debe empalmar en forma muy suave con el perfil mismo del diente.

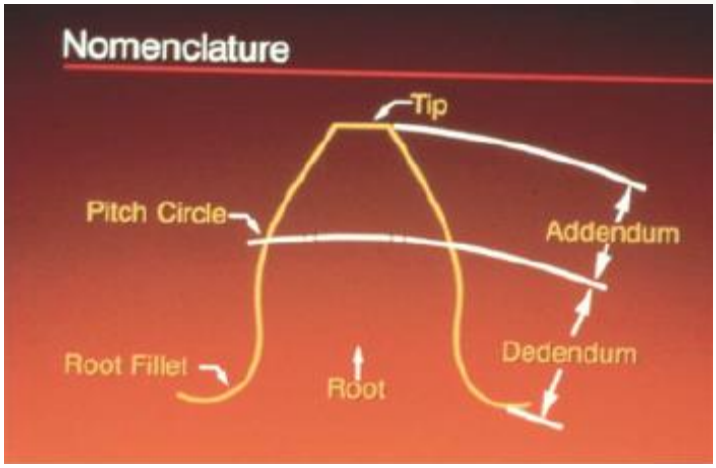


Figura 298

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Por lo general los dientes de los engranajes son algo más grueso en el centro para evitar contacto en los extremos de los dientes. Esta zona más gruesa es conocida como la corona del diente. La saliente del diente es la medida a lo largo del perfil respecto a la línea del centro. La saliente se chequea, por lo general, midiendo la distancia desde la línea de centro del eje hasta la línea del paso en la superficie, a todo lo largo del diente. La forma de la cara del diente es llamada la envolvente. Una saliente de diente incorrecta puede cambiar la ubicación de la corona y la envolvente, lo que a su vez puede producir concentración de esfuerzo, desgaste anormal y la fractura del diente.

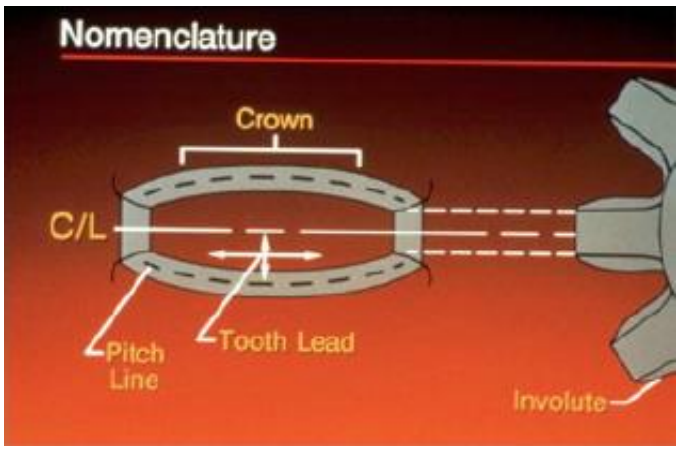


Figura 299

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

También es importante que el posicionamiento entre dientes respecto a su largo sea el correcto, de tal forma que la corona y la envolvente encajen correctamente. Con engranajes de piñón y corona, este ajuste se logra por lo general posicionando el piñón.

Figura 300

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Juego entre dientes

El juego libre (juego entre dientes) es la distancia que queda entre dientes luego de haber instalados los engranaje. El juego libre compensa las variaciones de lubricación, pequeñas desviaciones del perfil del diente. Deflexiones del diente bajo carga, excentricidad del diente, deformaciones térmicas, etc. En los engranajes de piñón y corona el sujeto libre se ajusta al movimiento la corona, acercándola o alejándola del piñón. La duración de los engranajes se ve afectada ya sea cuando el juego libre es cercano a cero (muy ajustado) o por encima de lo nominal (muy suelto).

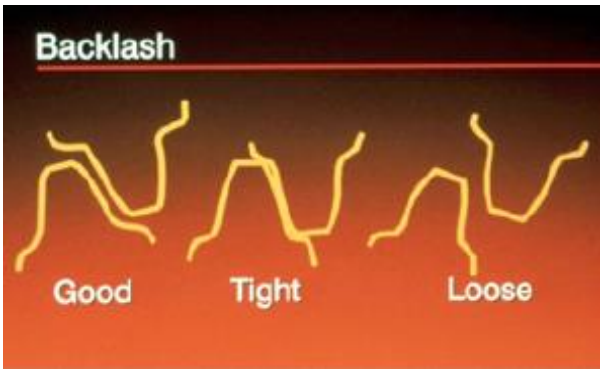


Figura 301

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Fabricación

Los pasos de la fabricación del engranaje comprende:

1) Producción de la rueda base
2) Maquinado en bruto
3) Tallado de dientes
4) Tratamiento térmico
5) Maquinado de acabado

Acá podemos observar el estado de un engranaje durante sus distintas etapas de fabricación. Ahora revisaremos brevemente estas etapas para comprender mejor la estructura y propiedades de un engranaje.

Figura 302

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Por lo general, las ruedas base de engranaje son producidas de acero forjado, pero también pueden ser labradas sobre una barra fundida o elaboradas en base de material sinterizado.

Carga en engranajes

Al ponerse los engranajes en operación, la carga produce esfuerzos internos, de flexión del diente en contacto, y movimiento de la superficie. La vida del engranaje se maximiza cuando la carga, el juego libre y la lubricación son los correctos. Una breve revisión sobre las cargas que recibe un diente sobre sus esfuerzos internos nos puede ser de utilidad.

Cuando el diente del engranaje empieza a hacer contacto, la punta del diente del engranaje conducido presiona por debajo de la línea de paso del diente del engranaje de mando. Si la punta hace contacto con demasiada presión, se produce una línea de altos esfuerzos ocasionando que la superficie se flexione, agriete y pique por debajo de la línea de paso. Los dos dientes se deslizan y ruedan uno respecto al otro conforme la línea de contacto se aproxima a la línea de paso. Obsérvese que en las fuerzas de deslizamiento en el engranaje de mando son hacia fuera de la línea de paso, mientras que en el conducido son hacia la línea de paso.

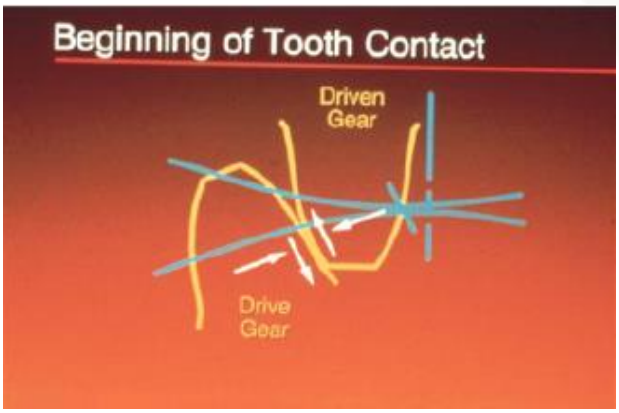


Figura 303

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Cuando los engranajes hacen contacto en su línea de paso, solo existe contacto de rodadura, no hay deslizamiento. A esto se le llama contacto pleno del diente.

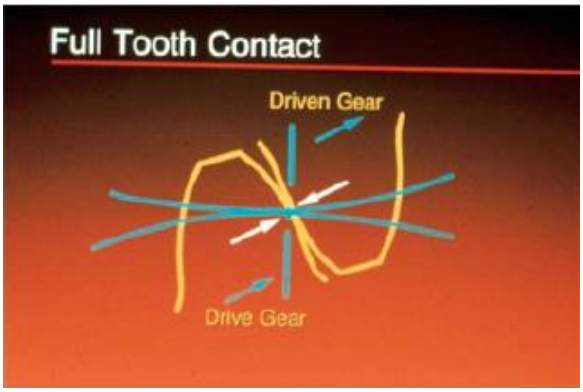


Figura 304

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Conforme se aplica carga en el engranaje de mando, se generan esfuerzos, compresión en el filete de raíz del lado opuesto del diente, y esfuerzos de tracción en el filete de raíz del mismo lado que está soportando la carga. Se generan esfuerzos similares en los dientes del engranaje conducido. Por lo general se diseñan los dientes de tal forma que la línea de paso este hacia el lado inferior del diente, esto para reducir los esfuerzos de flexión. Esto les da a los dientes un dedendum más corto y un addendum más grande. En este tipo de engranaje encontraremos mayores esfuerzos por contacto de deslizamiento por encima de la línea de paso que por debajo de ella. Esto será de consideración cuando discutamos el desgaste adhesivo y abrasivo.

Figura 305

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

El contacto de las superficies no se produce en un solo punto, sino a lo largo de toda una la línea en la cara del diente. Conforme la carga se hace más pesada, esta línea se ensancha y transforma en una banda debido a la deformación plástica de la cara de los dientes. El patrón de las líneas de contacto varía con el diseño del diente. En general a mayor Angulo de los dientes (como los engranajes espirales y helicoidales), más vertical será la línea de contacto. A menor ángulo de los dientes (como en los engranajes rectos), más longitudinales al diente serán las líneas de contacto.

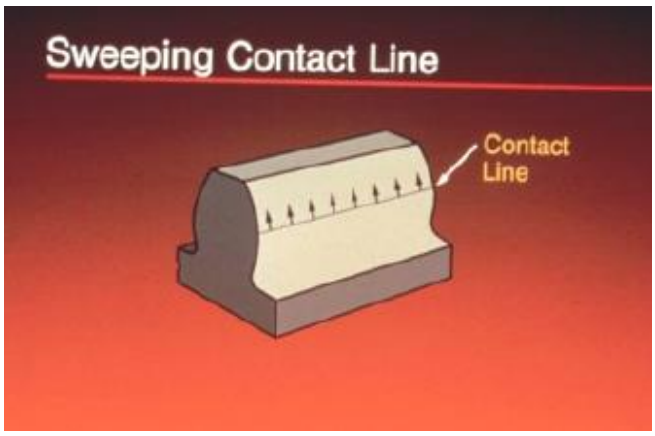


Figura 306

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Cuando los dientes de los engranajes están angulados (helicoidales, espiral etc.), se produce un empuje axial tanto en el engranaje de mando como en el conducido, haciendo necesario la utilización se cojinetes apropiados.

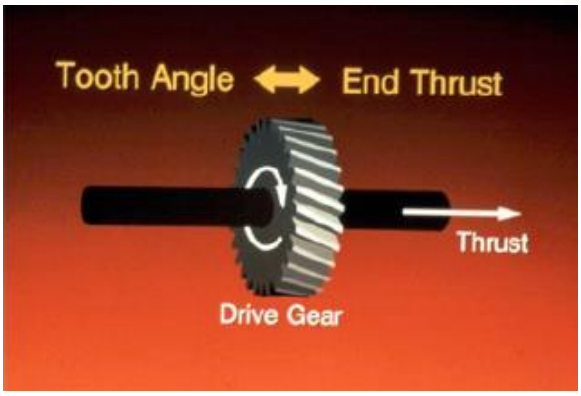


Figura 307

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

A pesar que los dientes del engranaje son fuertes, estos se flexionan bajo carga. Pero son diseñados de tal forma que esta deformación está dentro del rango de deformación elástica. Si el diente es conducido cíclicamente solo en una dirección, podemos esperar una posible propagación de una grieta en fatiga progresando en un solo sentido e iniciándose en un área de alta concentración de esfuerzos por tracción, tal como en el filete de raíz. Si el diente es sometido a cargas cíclicas por ambos lados podemos esperar una posible propagación de grietas por fatiga a flexión iniciándose por ambos filetes, produciendo fracturas por fatiga de flexión inversa.

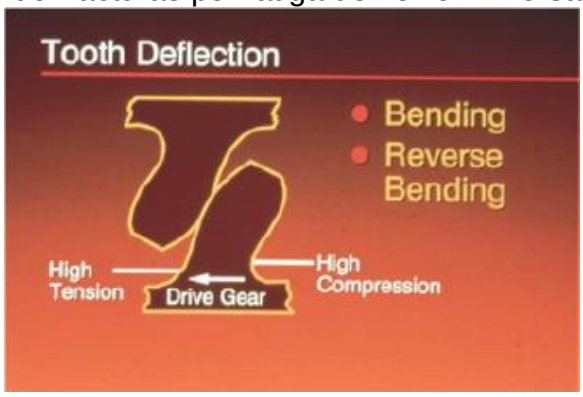


Figura 308

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Además de la flexión elástica del diente, la cara también se deforma elásticamente bajo la carga. Durante el contacto deslizante y de rodaduras combinados, ya sea por encima o por debajo de la línea de paso, la superficie curva de la cara del diente es aplanada elásticamente y se mueve en dirección opuesta a la fuerza de deslizamiento. Durante el contacto de rodadura la deformación plástica de la superficie curva se produce en ambas direcciones así como su movimiento. El tratamiento térmico, produce superficies más duras y resistentes lo que ayuda a soportar estos movimientos.

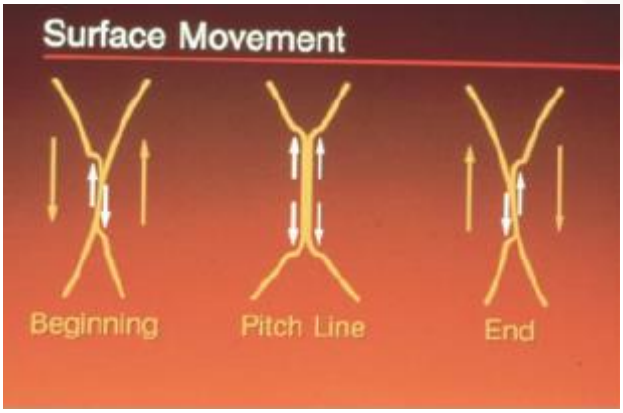


Figura 309

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

El juego libre entre dientes es el espacio libre radial entre ellos. Cada engranaje tiene un juego libre por diseño, el cual compensa por pequeñas desalineaciones del diente, desviaciones en el espaciamiento de dientes, perfil irregular, deflexiones producidas por la carga, dilatación térmica, problemas de lubricación, etc. Si los engranajes se pudieran fabricar en forma perfecta, con materiales perfectos, un menor juego libre aumentaría la vida de los engranajes, pero la manufactura, el material y el medio ambiente no son perfectos y el ajuste correcto del juego libre es importante. Por lo tanto, si el juego libre se ajusta mucho o se deja suelto, podremos esperar una menor duración del engranaje.

Figura 310

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Lubricación en engranajes

La lubricación es un factor muy importante en la vida del engranaje debido a que no solo lubrica (separa las superficies de contacto), sino que remueve el calor generado y mantiene los engranajes limpios. Debido a que los distintos tipos de engranajes tienen distintas interacciones de rodadura y deslizamiento, se requieren especificaciones de lubricación diferentes. Y los rodamientos asociados con los engranajes pueden requerir diferentes calidades de lubricante. Por lo tanto es importante que se utilice el lubricante

especificado por el fabricante y que sigan sus recomendaciones sobre los intervalos de cambio de aceite y filtro.

Sin embargo, a pesar que la cantidad y calidad del lubricante sean correctos, los entornos hostiles en los que trabajan pueden hacer que los dientes de engranajes penetren la película de aceite y tengan un contacto directo. La carga excesiva, altas temperatura, y excesivas RPM son algunos de los entornos hostiles más comunes.
Hay muchos factores que desempeñan su parte en buena lubricación. Dos películas de aceite, la capa límite y la capa hidrodinámica mantendrán separados y lubricados los dientes de un engranaje sometido a carga. Además de estas etapas, el equilibrio térmico de las superficies, la temperatura ambiente, la viscosidad del aceite, la aplicación de carga y los lubricantes de extrema presión juegan un papel importante en una lubricación apropiada. Si los lubricantes se sobrecalientan, se pueden oxidar, vaporizar y solidificar. Los aceites para motor más livianos se descomponen a temperaturas tan bajas como 250 º F, mientras que el más pesado de los aceites para engranajes pueden soportar temperaturas hasta 500º F antes de descomponerse.
La capa límite de aceite provee lubricación conforme los dientes del engranaje empiezan hacer contacto, y cuando terminan de hacerlo (mayormente durante la acción deslizante). La capa limite se forma cuando entran en contacto y reacciona el lubricante con el calor, la atmósfera y las superficies de los engranajes, produciendo una película semisólida y suave que se adhiere químicamente a las superficies del engranaje. Esta delgada capa es difícil de remover o penetrar, y es efectiva para prevenir contactos ásperos y adherencias a bajas RPM, bajo condiciones de carga moderada. Los cojinetes y engranajes de los mandos finales operan la mayor parte del tiempo con lubricación de capa límite.

Conforme las RPM aumentan, la superficie del engranaje trata de arrastrar lubricante consigo, formando una capa de lubricación hidrodinámica (hidro significa fluido, dinámica significa movimiento). Cuando las RPM son de moderadas a altas, la capa hidrodinámica es la película efectiva de lubricación.

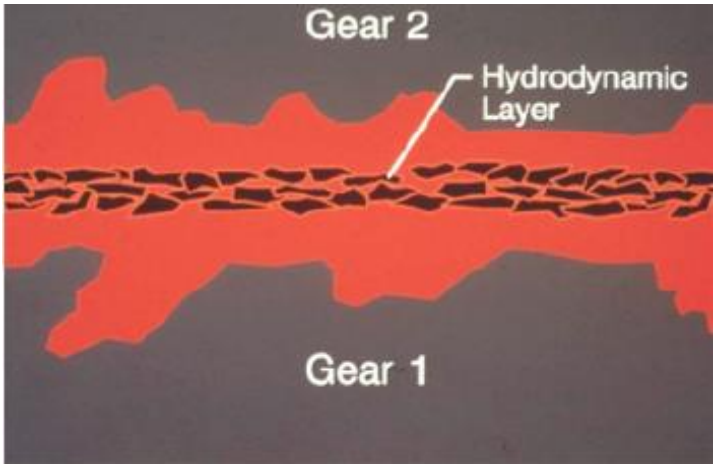


Figura 311

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Bajo cargas severas y velocidades de moderadas a altas, la película hidrodinámica de aceite se convierte en elastohidrodinámica, nombre que se debe al aplanamiento elástico de las superficies del engranaje y la acción hidrodinámica del aceite. Las capas de lubricación elastohidrodinámica son muy delgadas (una fracción de una milésima de pulgada), tiene una viscosidad aparente elevadísima, y puede soportar cargas extremadamente altas.

Figura 312

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Temperatura de equilibrio

El calor de fricción generado por la carga aplicada sobre los dientes conforme ruedan y se deslizan, es removido principalmente por el lubricante. La temperatura de equilibrio de la superficie del diente se logra cuando; bajo cargas, velocidades, temperatura ambiente, y viscosidad de aceite establecido; el calor generado es igual al calor evacuado. Si se la carga, la RPM, la temperatura ambiente, y la viscosidad del aceite, aumentara la temperatura de equilibrio, y esta temperatura llega a ser muy alta, la película de aceite se romperá y ya no separara los dientes de engranaje.

Muchos factores ambientales, pueden afectar la temperatura de equilibrio y la vida del engranaje. Estos factores incluyen la temperatura del aire justo alrededor del componente, el color del componente(los colores claros reflejan y los obscuros absorben), son directos o sombras, viento o ausencia de él, etc. Si pudiéramos imaginarnos como nos sentiríamos en el lugar del engranaje, comprenderemos más fácilmente el efecto de las condiciones ambientales hostiles.

La viscosidad es la medida de la resistencia de los fluidos a fluir o deslizarse, cuando el aceite es removido y deslizado por la acción de rodado y deslizamiento de los diente, se genera calor en el aceite y aumenta su temperatura. La temperatura del aceite puede aumentar de 20 a 30º F en la superficie de un diente sometido a gran carga. Cualquier aumento en las RPM del engranaje, o en la carga aplicada, o en la temperatura ambiente, también aumentara la temperatura del aceite. Conforme

aumenta la temperatura del aceite, su viscosidad disminuye, disminuyendo con esto su capacidad a soportar carga.

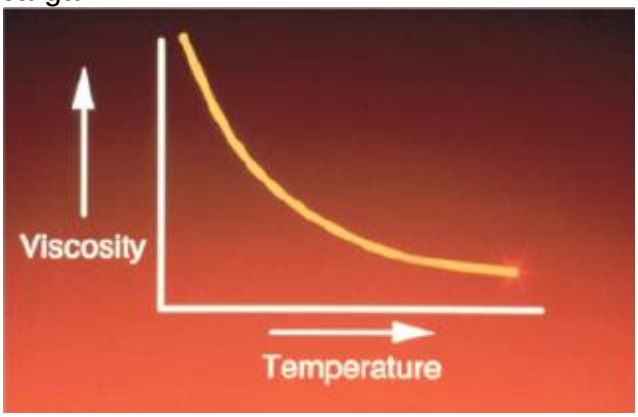


Figura 313

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Cuando la temperatura de lubricación se hace demasiado alta, el aceite se puede oxidar, vaporizar o solidificar. Una operación continua bajo condiciones de alta temperatura puede permitir la ruptura de estas películas de aceite y producir desgastes adhesivos.

Cuando los engranajes están sometidos a cargas severas a bajas velocidades, donde se minimiza la lubricación hidrodinámica, se utilizan los lubricantes de extrema presión (EP). Los lubricantes EP contienen aditivos que reaccionan químicamente con las superficies del engranaje o cojinetes para crear una capa de corrosión que actúa como lubricante, previniendo que las asperezas de la superficie del engranaje hagan contacto directo y se rayen. Esta película se forma más rápido cuando la temperatura es más elevada.
Es normal encontrar las caras de los dientes pulidas, con picaduras menores, con marca de maquinado, con láminas de escamas blancas, u opacadas. Si nos hacemos más familiares con estas condiciones normales, estaremos en mejores condiciones para determinar las condiciones anormales durante el examen visual de engranajes usados.

Al ponerse carga a un engranaje, las marcas del maquinado y los puntos irregulares empiezan a ser suavizados. Ocurre un pulimiento y debe estar centrado a lo largo del diente.

Figura 314

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Si en las zonas altamente cargadas se encuentran crestas o puntos altos, la superficie se agrieta y pueden comenzar a desarrollarse picaduras. Dichas picaduras son por lo general de un diámetro menor a 1/32 de pulgada, y tratan de distribuir la carga conforme y remueven progresivamente las áreas altas de contacto. Cuando la carga se distribuye en forma más pareja, las picaduras disminuyen y las superficies empiezan a pulirse. A esto se le llama “picaduras iniciales” o “picaduras correctivas”.

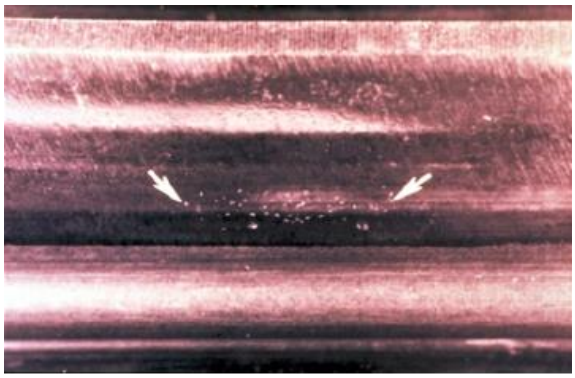


Figura 315

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Sin embargo, es más común que las marcas del afeitado o del rectificado se pulan sin desarrollar picaduras en la superficie. Las superficies que soportan cargas se pueden pulir hasta tener la apariencia de un espejo.

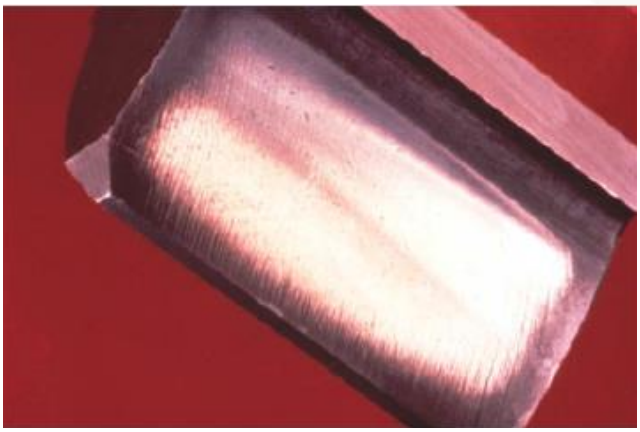


Figura 316

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Las marcas horizontales que aparecen en la superficie del diente son por lo general marcas del tallado basto, y por lo general son poco profundas para actuar como concentradores de esfuerzo que produzcan factores por fatiga. Las marcas de maquinado que observamos aquí son severas, pero no han causado ningún problema de operación o falla del diente.

Las marcas horizontales que aparecen en la superficie del diente son por lo general marcas del tallado basto, y por lo general son poco profundas para actuar como concentradores de esfuerzo que produzcan factores por fatiga. Las marcas de maquinado que observamos aquí son severas, pero no han causado ningún problema de operación o falla del diente.

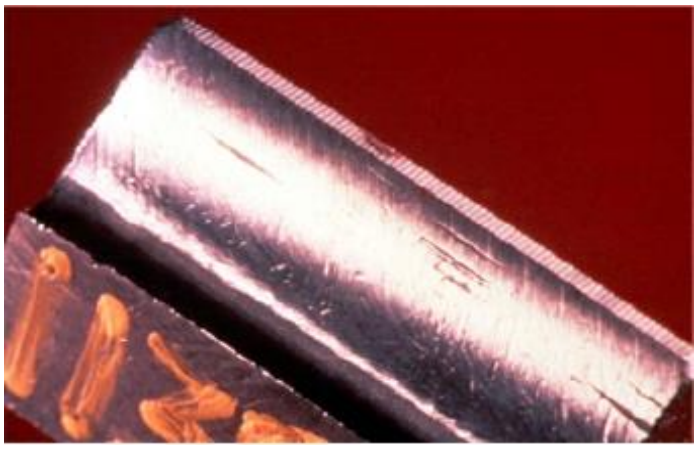


Figura 317

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Durante el nitrurizado no solo se crea una coraza dura sobre la superficie del diente, sino que también se crea una lámina muy delgada y frágil. Cuando esta superficie delgada y frágil se agrieta y desprende por efectos de la carga, muestra una coloración blanca a lo que se le llama láminas de escamas blancas.

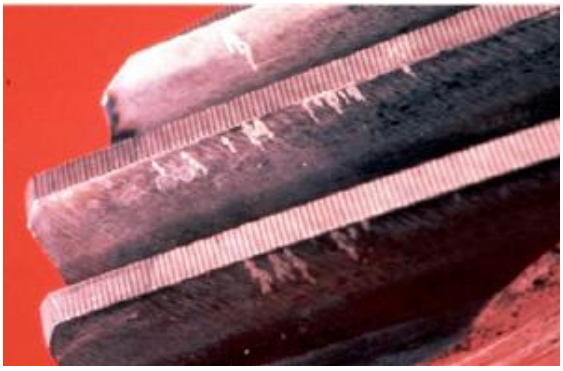


Figura 318

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Bajo amplificación visual, podemos observar que esta capa es uniforme y tiene un espesor de solo una fracción de milésima de pulgada, y que tiene una estructura metalográfica distinta a la del acero que está por debajo. Debido a que las láminas de escamas blancas no afectan las propiedades del acero que soporta la carga, estas no ocasionan concentradores de esfuerzo y se deben considerar como una condición normal.

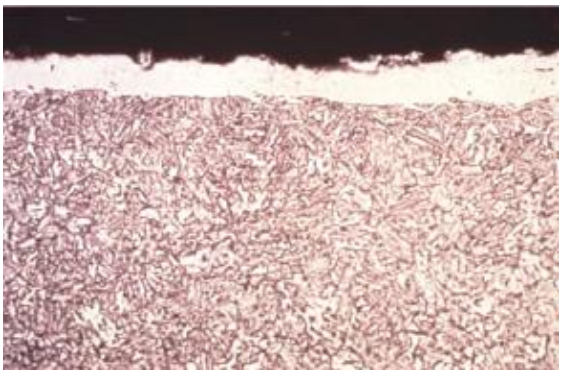


Figura 319

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Si estas láminas delgadas se desprenden en un área mayor, se presentara la condición llamada "escarchado" (frosting). Esto ocurre cuando las asperezas de la superficie hacen contacto y se producen micro soldaduras. Luego la superficie del metal es arrancada en escalas muy pequeñas. Esto da resultado a una apariencia mate gris, los cual no es un perjudicial en esta etapa. Sin embargo, si la causa que produce este escarchado no es eliminada, se iniciaran picaduras destructivas.

Condiciones anormales

Cuando en tren de engranaje empieza hacer ruido, usualmente existe daño o hay acoplamiento incorrecto. La mayoría de daños a los engranajes son el resultado de condiciones anormales tales como ensamble y ajuste incorrecto, cargas inadecuadas, deformación plástica, fatiga por esfuerzo de contacto, fracturas. El mantenimiento

correcto del sistema de lubricación minimiza la posibilidad que ocurran situaciones anormales, evitando desgastes innecesarios o fracturas.

Conforme estudiemos el desgaste anormal, debemos recordar de obtener evidencias sobre la ubicación y el tipo de desgaste, y las condiciones de carga. Una ubicación incorrecta del desgaste nos puede indicar que hubo desalineamiento o mal ensamble. El tipo de desgaste nos puede guiar a obtener más evidencias de áreas específicas. Una carga excesiva puede producir una flexión del diente y producir desgaste por desalineamiento.

Con una instalación correcta y una carga apropiada, el desgaste debe estar concentrado uniformemente sobre las caras del diente, tal como se muestra aquí.

Figura 320

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Un alineamiento incorrecto puede resultar en un patrón de desgaste centrado hacia la punta del diente.

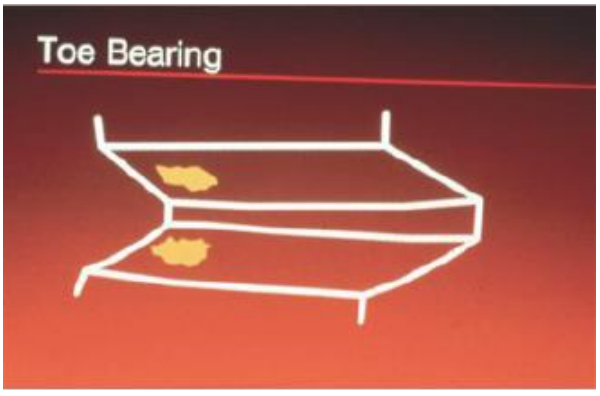


Figura 321

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

En una patrón de desgaste centrado hacia el talón del diente (algunas veces causado por sobrecargas).

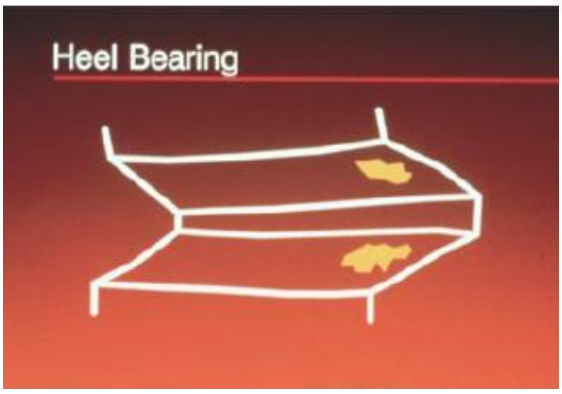


Figura 322

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

En un patrón de desgaste centrado en el fondo del diente.

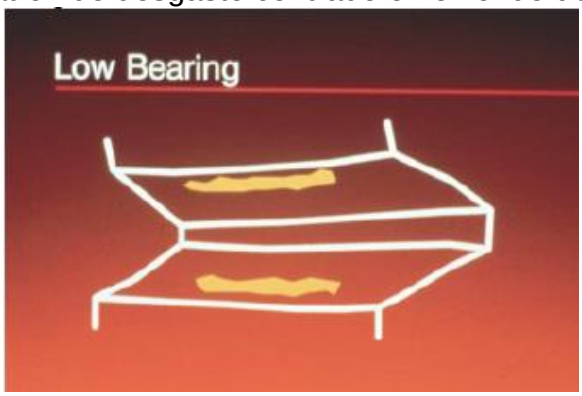


Figura 323

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

O en un patrón de desgaste centrado en la parte superior del diente, etc.

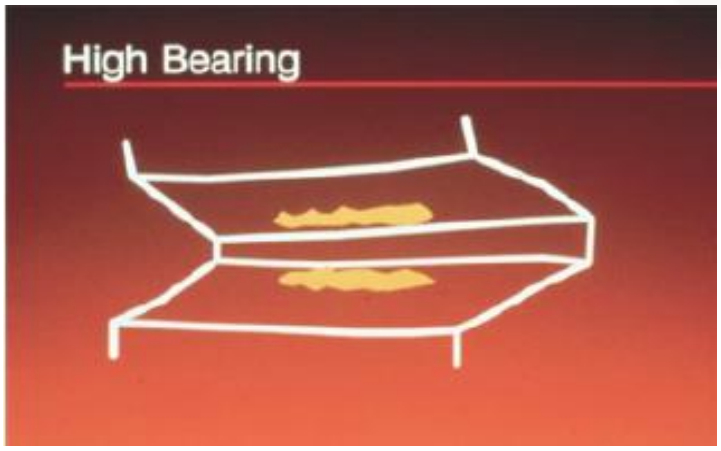


Figura 324

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Cuando encontramos desgaste anormal en los dientes de un engranaje, será más evidente el desgaste por encima y por debajo de la línea de paso, ya que en estas zonas ocurre contacto de deslizamiento. Por lo general, en las líneas de paso donde solo hay contacto de rodadura, encontraremos menos desgaste.

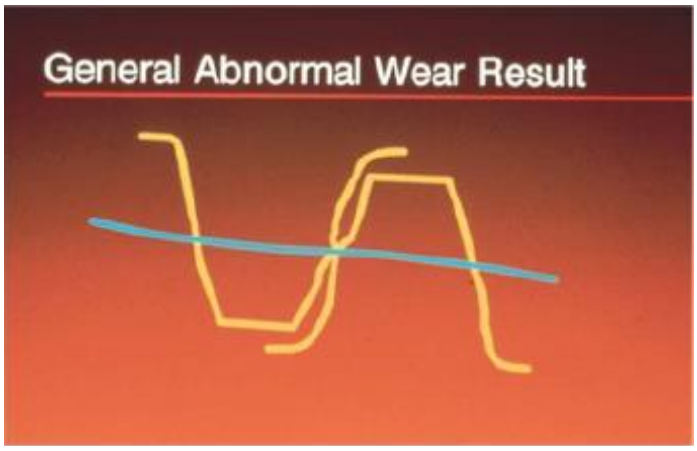


Figura 325

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Este gráfico nos muestra los rangos de operación de un engranaje en relación a la carga que resiste y a su velocidad de trabajo indicándonos las zonas en las que se produce desgaste, ralladuras, picaduras o fractura del diente del engranaje. En el área (1) la velocidad es baja y la carga es alta, permitiendo mayor contacto y desgaste. Obsérvese la zona (2) donde la carga, la velocidad y la lubricación son correctas (existe lubricación hidrodinámica y elastohidrodinámica); y donde el desgaste se previene. En la zona (3) la velocidad de contacto y la carga son lo suficientemente grandes para romper las películas de lubricación, permitiendo el

contacto de metal con metal y produciéndose raspaduras. En la zona (4) las cargas y velocidades son lo suficientemente grandes para flexionar las superficies y producir su agrietamiento y picaduras. En la zona (5) la carga y velocidad son tan grandes que romperán el diente. Lo importante de recordar es que tanto la carga como la velocidad pueden ser inapropiadas, ocasionando el desgaste de los dientes del engranaje y su posterior fractura.

Desgaste por abrasión

La presencia de partículas abrasivas en el lubricante es la condición anormal más común que daña a los engranajes. Si las partículas contaminantes son pequeñas, se producirán ralladuras muy finas y el pulimiento del diente. Si las partículas son grandes, se producirán ralladuras profundas, cortes y adherencias.

Si durante la operación del engranaje estuvieron presentes partículas muy pequeñas, los dientes se verán pulidos como espejo y en forma prematura.

Figura 326

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Una inspección más cercana nos muestra que, con anterioridad, se han producido una serie de picaduras, esto es evidente debido a que los filos están pulidos debido a la acción abrasiva. Debemos obtener más información sobre su pasado para entender por qué se desarrollaron las picaduras. (Los engranajes averiados pueden ocasionar que los sellos se dañen permitiendo que entre suciedad. Posiblemente es lo que ocurrió aquí).

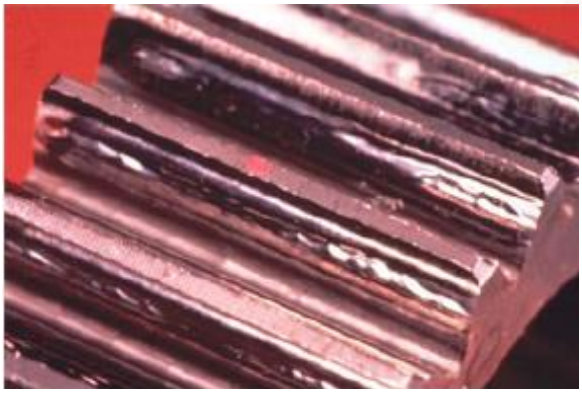


Figura 327

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Partículas más grandes pueden producir ralladuras notorias en la superficie endurecida del engranaje.

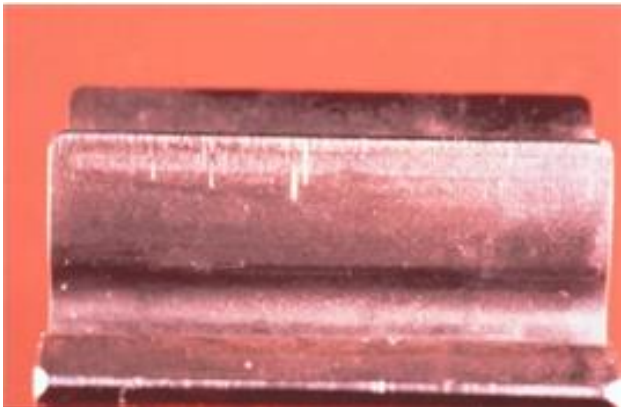


Figura 328

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Obsérvese que las ralladuras son más notoria por encima y por debajo de la línea de paso, debido a que el contacto deslizante con las partículas atrapadas ocurre allí, mientras que en la línea de paso solo de produce rodadura. Y cuando el addendum, la mayoría de cortes y ralladuras de producirán en el addendum.

Figura 329

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Conforme los engranajes se deterioran, se pueden desprender trozos más grandes de la cara dura recirculando entre los dientes y produciendo adherencias o indentaciones. Un trabajo continuo con contaminantes duros puede producir que la superficie dura se agriete y desprenda exponiendo el núcleo que es más blando. Obsérvese que el diente presenta menos daños en la línea de paso.

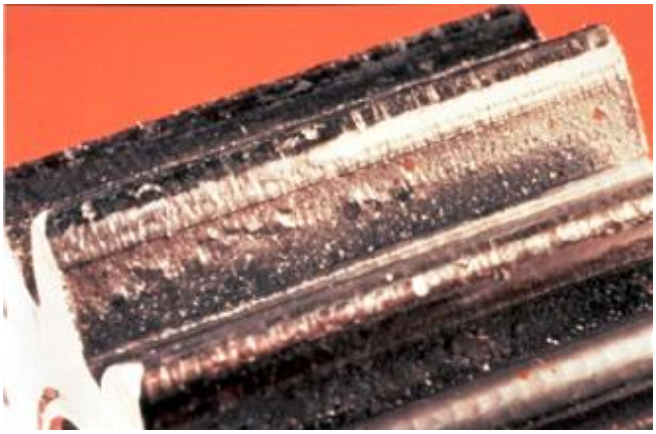


Figura 330

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Una vez que le desgaste ha progresado hacia el núcleo blando, el diente se desgasta más rápido y se acanala y corta con mayor facilidad. En esta condición deteriorada, el diente se puede fracturar bajo, cargas normales.

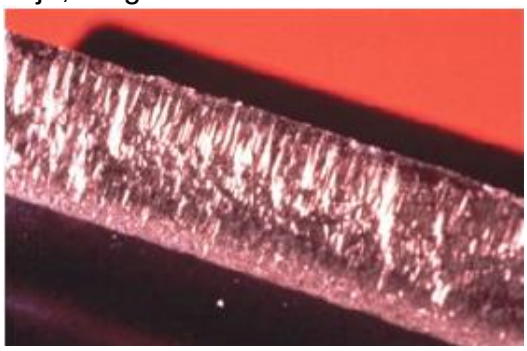


Figura 331

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Algunas veces, las piezas más blandas que trabajan alrededor del engranaje pueden registrarse evidencias más claras sobre el desgaste que el engranaje mismo. Debemos examinar cuidadosamente dichas partes en busca de partículas incrustadas u otras piezas que nos pueden ayudar a identificar las partículas abrasivas. Una vez que hemos identificado las partículas, sabremos qué dirección tomar para encontrar la causa raíz.

Figura 332

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Desgaste por adherencia

El desgaste adhesivo, algunas veces llamado raspadura, se produce por el contacto metal con metal bajo carga. Puede iniciarse en el diente del engranaje cada vez que la película de aceite(o su resistencia) es insuficiente, cuando la carga o velocidad es excesiva, cuando existe desalineamiento, etc. El contacto metal con metal significa que los puntos altos del metal entran en contacto y se micro sueldan. Este contacto en forma continua producirá más micro soldaduras y mayor desprendimiento de metal. Por lo general, estas raspaduras se producen por encima o por debajo de la línea de paso, donde existe contacto de deslizamiento, y puedan producir una superficie irregular y acanalada. Nuevamente, se encuentra menos daño en la línea de paso debido a que solo se produce contacto de rodadura. Los conceptos importantes de recordar son:

Velocidad + carga + deslizamiento = calor

Calor = oxidación de la película de aceite, evaporación, descomposición, desaparece el lubricante.

Problemas con la película de aceite = contacto metal con metal y altas temperaturas

Altas temperaturas = micro soldaduras y raspaduras.

Aquí conservamos la etapa inicial de las raspaduras producidas por el diente del otro engranaje que fue capaz de penetrar la película de aceite y hacer contacto con las asperezas de la superficie, micro soldando y desprendiendo parte del material de la superficie del diente.

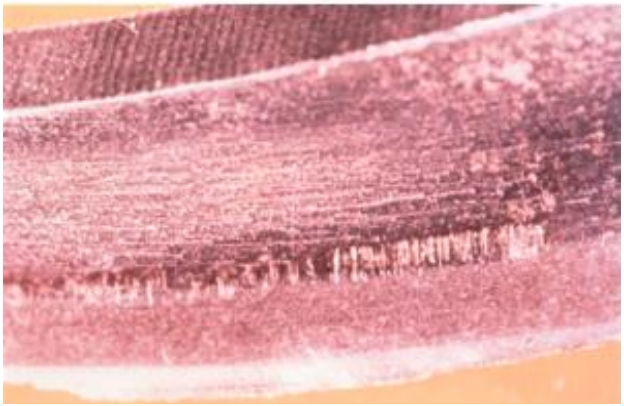


Figura 333

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Conforme progresa el desgaste adhesivo, por lo general se produce daño por encima y por debajo de la línea de paso, tal como observamos aquí. Obsérvese que existe poco daño sobre la línea de paso, donde solo se produce un contacto de rodadura, y que las rapaduras han progresado más en el adendum que en el dedendum es más grande que el dedendum.

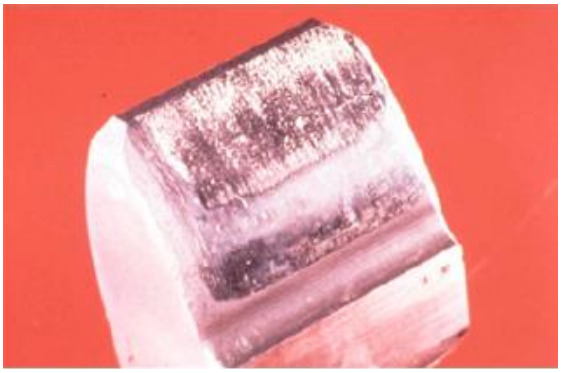


Figura 334

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Una operación continua con una película insuficiente de aceite nos puede llevar rápidamente a una adhesión masiva y desprendimiento de material de la superficie de los dientes. El daño resultante puede progresar a través de la línea de paso.

Figura 335

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Conforme progresa el desgaste adhesivo, el juego de los dientes crecerá rápidamente produciendo ruido durante el funcionamiento. Los engranajes pueden desarrollar una apariencia carbonosa, negra. Los dientes se pueden micro soldar y desgastarse hasta quedar filudos. En nuestra búsqueda de evidencias o hechos para explicar este desgaste adhesivo, debemos buscar primero en el sistema de lubricación.

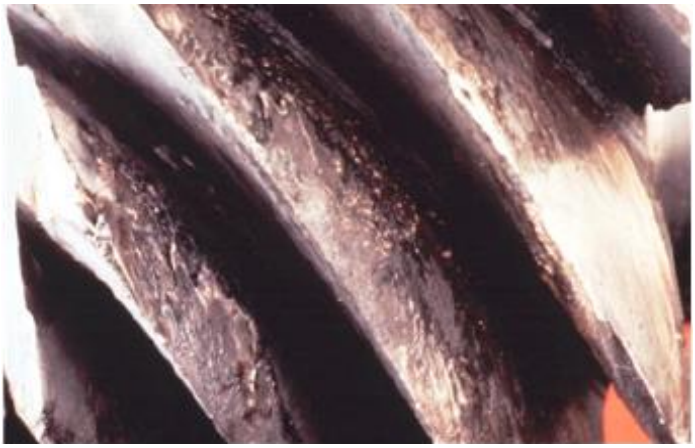


Figura 336

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

La última etapa de desgaste adhesivo es la fusión localizada por la alta temperatura, micro soldado, y deformación plástica como observamos en esta vista.

Figura 337

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Si existe un problema de alineamiento o ajuste, solo una parte del diente del engranaje será la que soporte todas las cargas aplicadas, sobrecargando las películas de aceite en esas áreas y produciéndose desgaste adhesivo. También es de esperar que el desalineamiento pueda producir la sobrecarga de la superficie del diente y posiblemente su rajadura, picado o fractura. Los engranajes compañeros pueden tener problemas en la forma de perfil, o pueden estar sueltos sobre sus ejes, etc. Las otras piezas deben ser examinadas para obtener evidencias que nos conduzcan a la correcta causa raíz del problema.

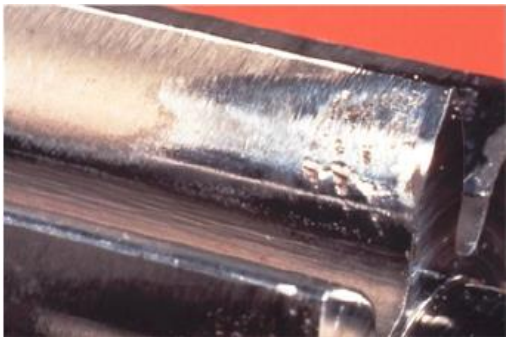


Figura 338

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Desgaste por corrosión

El desgaste corrosivo rara vez produce falla en los engranajes, debido a que la mayoría de los comportamientos de los engranajes están protegidos de los ambientes corrosivos y están llenos de lubricantes que previenen la corrosión. Sin embargo, si se presentaran ambientes anormalmente corrosivos, debemos ser minuciosos en la búsqueda de señales de corrosión tales como la decoloración o herrumbre, picaduras en la superficie, y contaminación del lubricante.

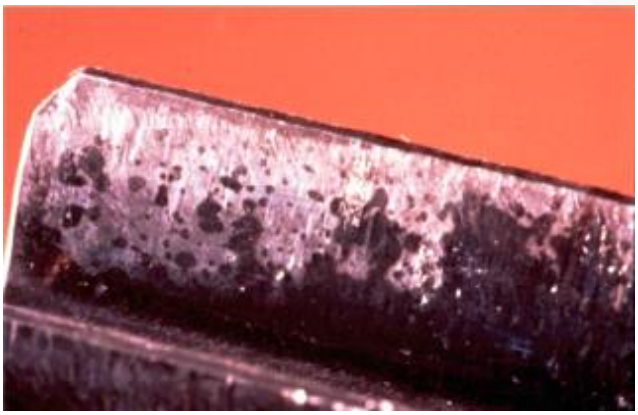


Figura 339

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

O, la corrosión puede crear picaduras uniformes sobre la superficie de los dientes, pero estas picaduras pueden ser tan pequeñas que no afectaran el funcionamiento del engranaje. Los rodamientos fallan más frecuentes debido a estas condiciones corrosivas que los dientes de los engranajes.

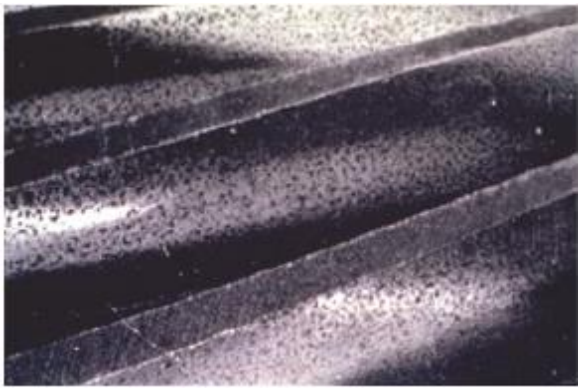


Figura 340

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Una exposición prolongada al ambiente corrosivo permitirá el desarrollo de un daño mayor a la superficie, tal como la observamos. Si las partes relacionadas con la falla han sido protegidas cuidadosamente luego de la falla, podremos deducir que la corrosión ocurrió durante el servicio—Una pista significante para encontrar la causa raíz de la falla.

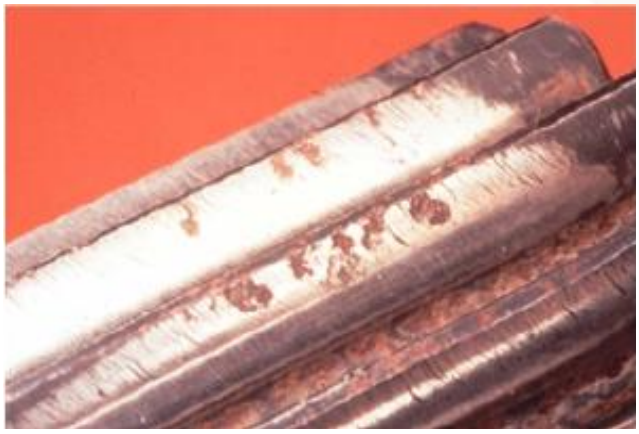


Figura 341

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

La corrosión debe afectar cualquier área del metal del engranaje que se encuentre desprotegida, no solamente la superficie del diente. Aquí observamos el extremo de un engranaje que presenta daño por corrosión. Los dientes internos también deben mostrar algún efecto de la corrosión.

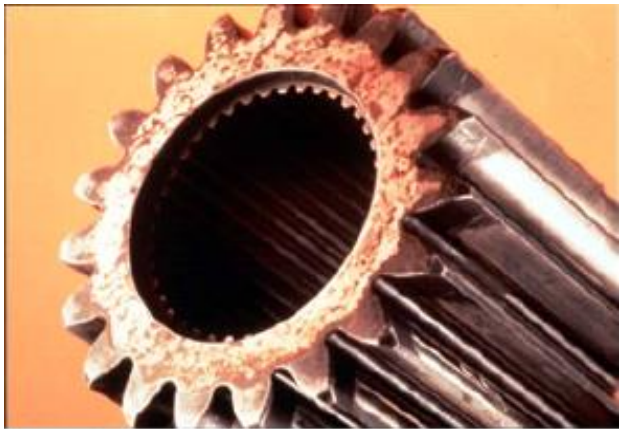


Figura 342

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Una inspección cercana con amplificación, nos muestra que las estrías internas están descoloridas y rugosas.

Figura 343

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Con mejor iluminación y una mayor amplificación visual, podemos comprobar que la decoloración y la rugosidad son el producto de la corrosión y las picaduras.

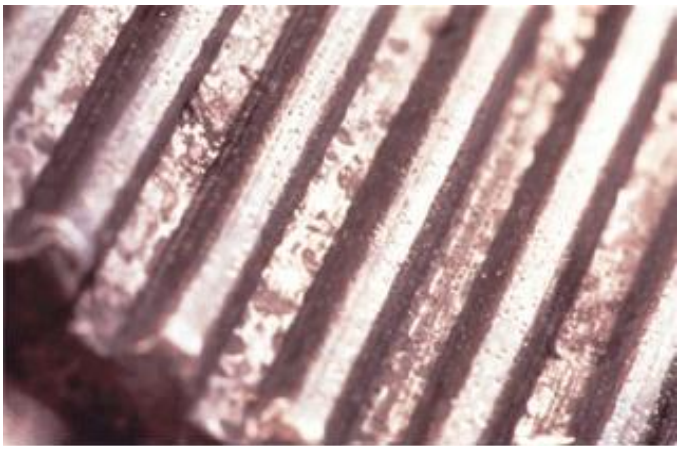


Figura 344

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

En resumen, la corrosión puede producir picaduras y la posterior falla del diente del engranaje. El daño se inicia con un descolorido de la superficie y picaduras menores.

Figura 345

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Las irregularidades de la superficie pueden producir concentración de esfuerzos y la interrupción de la película de aceite, permitiendo el agrietamiento y las picaduras de áreas mayores de las superficies endurecidas.

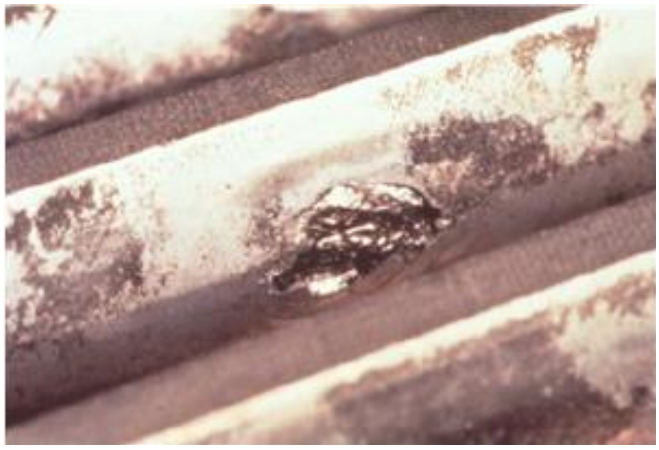


Figura 346

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Eventualmente es posible que el recubrimiento duro se desprenda en áreas más anchas. Sin embargo, debemos recordar que la corrosión es la responsable de la falla del engranaje, se debe notar los efectos de la corrosión en los alrededores de la cara del diente deteriorado.

Figura 347

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Si los lubricantes se contaminan severamente con humedad, se puede producir la emulsión y "adelgazamiento" del aceite o estar lubricando con agua, llevándonos a una pérdida de lubricación y producirse desgaste adhesivo además del corrosivo. Obsérvese que se han producido raspaduras en la perforación y en el respaldo de este engranaje. Debemos observar todas las superficies del engranaje y buscar evidencias como esta.

Figura 348

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Deformación plástica

Otro tipo de falla en los engranajes es la deformación plástica (desplazamiento permanente del metal de la superficie del engranaje). Esto puede ocurrir cuando los engranajes son muy blandos, soportan demasiada carga, o cuando la película de lubricación es inadecuada y permite el contacto metal - metal. Estas condiciones pueden provocar que las superficies del engranaje fluyan creando rebabas o rebordes, ondulaciones, picaduras o desprendimiento Debemos ser cuidadosos en no confundir las rebabas del maquinado de los dientes con la deformación plástica. Durante la manufactura del diente, en el corte basto o debido a la herramienta de afeitado, se

puede producir una pequeña fluencia de metal dejando rebabas como se Observa aquí. Por lo general estas pequeñas rebabas no dan problemas durante el servicio y se consideran aceptables.

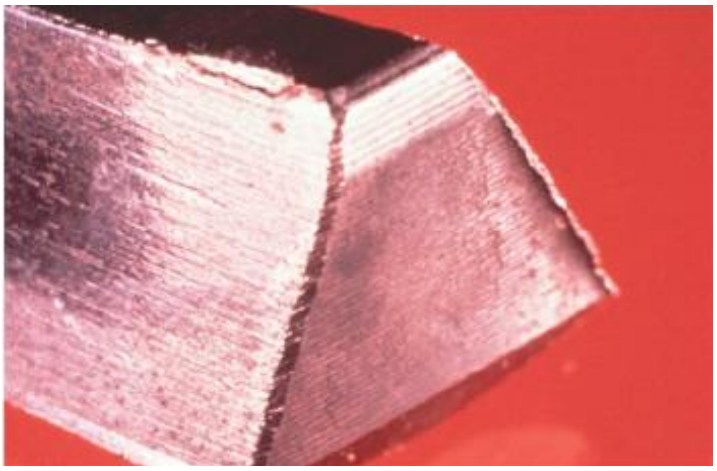


Figura 349

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

El ondulamiento es otra de las formas como se pueden manifestar la deformación plástica. La apariencia ondulada es el resultado de un movimiento plástico limitado de la superficie, pero no perturba la estructura cristalina de la superficie o su resistencia. Por lo general el ondulamiento se produce cuando las cargas son elevada y la película de aceite delgada. A pesar que el ondulamiento se vea alarmante, por lo general no se convierte en picaduras o agrietamiento de la superficie. Obsérvese que acá se ha producido una picadura independiente por debajo de la línea de paso, y que el ondulamiento (sin picaduras) se encuentra por encima de la línea de paso. Ambos, el ondulamiento y la picadura son indicadores de altos esfuerzos en la superficie.

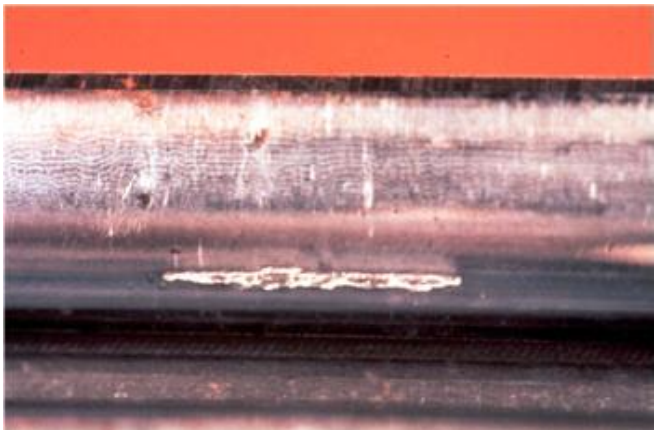


Figura 350

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

La formación de labios y el afilado son otras evidencias de una deformación plástica. Esto es el resultado de la deformación permanente de la superficie del engranaje debido a que no es lo suficientemente fuerte para soportar las cargas aplicadas.

Observe que el diente vecino se ha roto, y que el diente sobreviviente se ha afilado debido a las cargas del choque y sobrecargas por la ausencia de los otros dientes. Si un diente es sometido a cargas hacia delante y hacia atrás, es de esperarse que se deformen por ambos lados tal como se muestra. Es necesario tener presente la posibilidad que la carga sea excesiva, y que la lubricación o temperaturas de las superficies sean inadecuadas, así como que el diente puede ser blando.

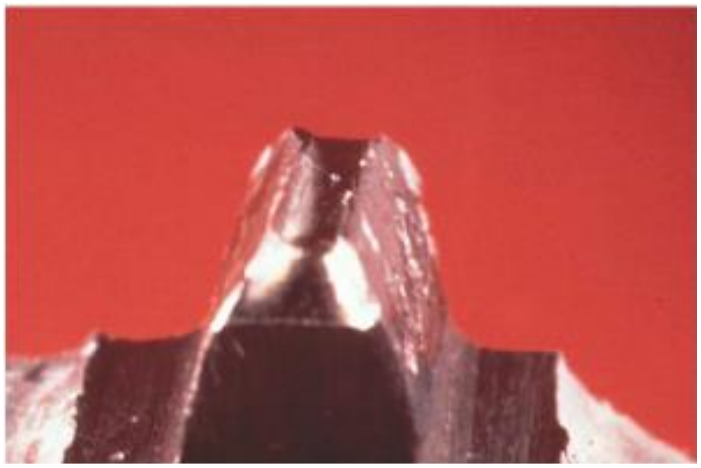


Figura 351

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Fatiga por esfuerzos de contactos

La fatiga por esfuerzos de contacto puede producir que la superficie del diente se agriete, pique y desprenda. Cuando el diente engranaje se somete a cargas, la flexión elástica del metal de la superficie creas esfuerzos cíclicos de tracción y corte. Cuando el movimiento de la superficie y sus esfuerzos llegan a ser muy altos, se pueden producir grietas por fatiga. Las posibles causas raíces son la excesiva carga o RPM, desalineamiento, juego libre inadecuado, servicio prolongado, lubricación inapropiada, temperaturas elevadas, geometría del engranaje incorrecta, etc.

A la distancia, parece ser que este diente solo tiene desgaste normal y pulimiento. ¿Puede usted? Observar alguna evidencia de grietas o picaduras

Figura 352

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Limpiando el diente y utilizando buena iluminación y aumento visual podemos observar que existe una rajadura y picadura severa por debajo de la línea de paso. Observe que la picadura se ensancha conforme llega más arriba, tomando la forma de una “v”, lo cual es característico de una picadura en un buen diente.

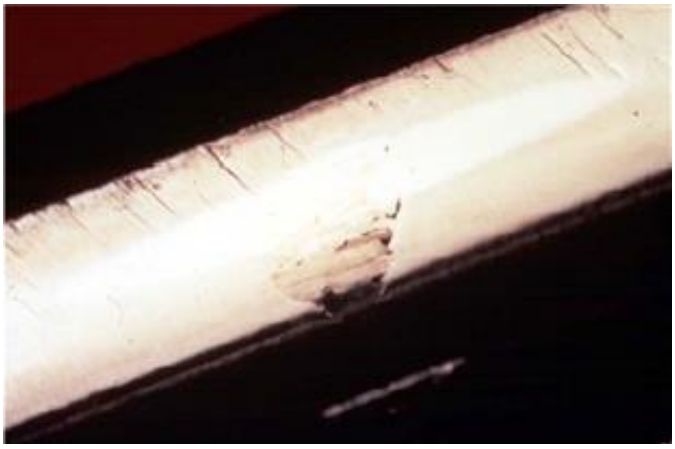


Figura 353

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Si se mantiene en servicio un engranaje con picaduras, se desprenderán trozos mayores de la superficie del diente, provocando un funcionamiento ruidoso e introduciendo partículas duras en el sistema de lubricación. Este caso está clasificado como una picadura moderada, pero el engranaje va en camino a su falla.

Figura 354

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Como hemos observados en estos ejemplos, las grietas por esfuerzos de contacto deslizantes usualmente progresan hacia arriba, se ensanchan, y forma y una picadura en “V”. Observe que la superficie del diente tiene más grietas progresando hacia arriba desde la esquinas de la picadura.

Figura 355

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Algunas veces la forma de la “V” no es tan evidente, pero la tendencia de la picadura a ensancharse y progresar hacia el adendum es aun evidente. Es usualmente la carga deslizante, no le de rodadura, la que provoca el desarrollo y crecimiento de las picaduras.

Figura 356

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Una vez que la picadura se ha iniciado la superficie del diente alrededor de ella soportara más carga, desarrollando grietas y picaduras secundarias. Eventualmente el diente debilitado empezara a fracturarse. Conforme aumentan la rugosidad de la superficie y el juego libre entre los engranajes, el ruido en funcionamiento también aumenta y el operador podrá notar que hay fallas en progreso.

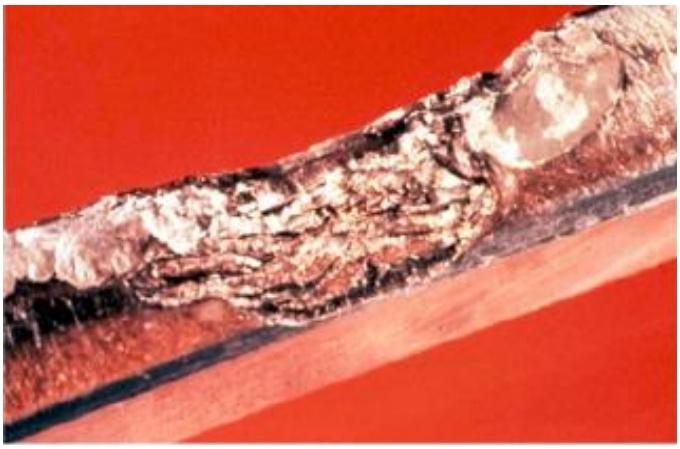


Figura 357

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Conforme empiezan a desprenderse los trozos restantes de un diente dañado, solo quedara una serie de picaduras y trozos fracturados con superficies rugosas. Se han eliminado las pistas que podrían indicarnos la causa del daño del diente. Debemos observar los otros dientes del engranaje, o a los dientes del engranaje compañero, para buscar evidencias que nos guíen a la causa raíz de la falla. Observe que el siguiente diente de este engranaje nos muestra una fuerte línea de contacto al lado del talón, sugiriéndonos que hubo un contacto desalineado.

Figura 358

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

La corona compañera también muestra picaduras destructivas (desprendimientos). Hay presencia de pulimiento severo y rajaduras en el lado derecho de los dientes, así como desprendimientos más avanzados. Debemos estudiar los dientes dañados más de cerca para entender lo que está sucediendo.

Figura 359

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Luego de limpiar e inspeccionar de cerca con buena iluminación el diente menos dañado, encontramos rajaduras profundas paralelas a la línea de paso. A este tipo de rajadura de la superficie se le llama aplastamiento de la coraza o recubrimiento y resultan cuando las cargas de comprensión por rodaduras son mayores que la resistencia de la superficie del diente, provocando el movimiento excesivo de la superficie dura del diente contra el núcleo más blando. Las posibles causas son:

1) La carga excesiva
2) El núcleo del diente es muy blando
3) El recubrimiento del diente es muy delgado
4) La carga esta desalineada, etc.

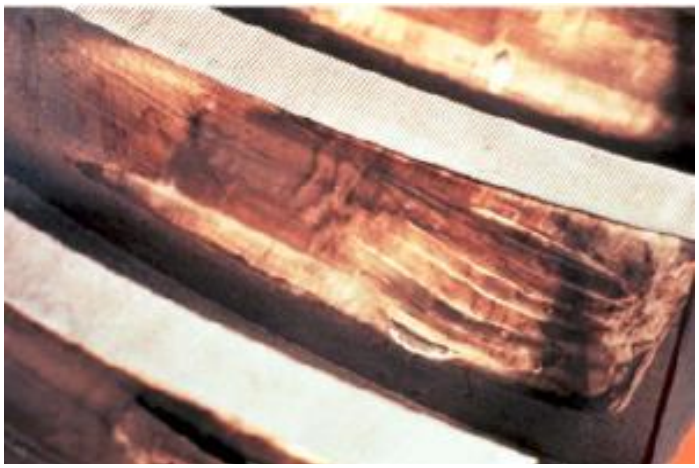


Figura 360

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Si se continúa operando luego que se han producido las grietas en la superficie, habrá desprendimientos removiendo grandes áreas de la superficie del diente. Conforme progresa el daño, las evidencias originales son eliminadas, dejando solamente los resultados en las caras fracturadas y rugosas. Eventualmente, la única pista que nos queda es que un lado del diente está más severamente dañado que el otro, sugiriéndonos una carga deslindada. Usualmente es la carga de rodadura la que produce el aplastamiento de la superficie, tal como la vemos aquí.

Figura 361

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Una inspección más cercana del diente del piñón nos muestra que la carga aumento dramáticamente en el diente que está a continuación del fallado. Observe el pulimiento severo en el talón y las picaduras presente justo encima del filete de la raíz.

Figura 362

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Con buen aumento e iluminación podemos observar que una rajadura por fatiga está progresando por la mitad justo arriba del área picada. Esta rajadura por fatiga es el resultado de una carga cíclica anormal causada por desalineamiento y por la falla previa del diente dañado.

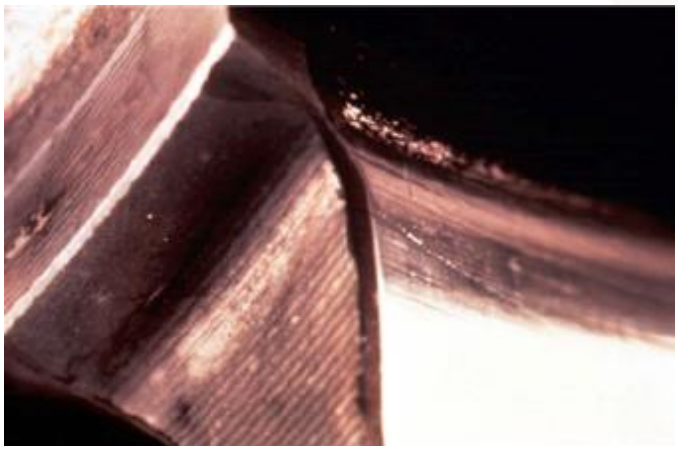


Figura 363

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Fracturas por fatiga

Por lo general las fracturas por fatiga se inician en la raíz del diente, debido a que el máximo esfuerzo de tensión (causado por la flexión del diente), se encuentran allí. La cara de la fractura usualmente progresa ligeramente hacia abajo dentro del cuerpo del engranaje, luego de dirige hacia arriba donde ocurre la fractura final.

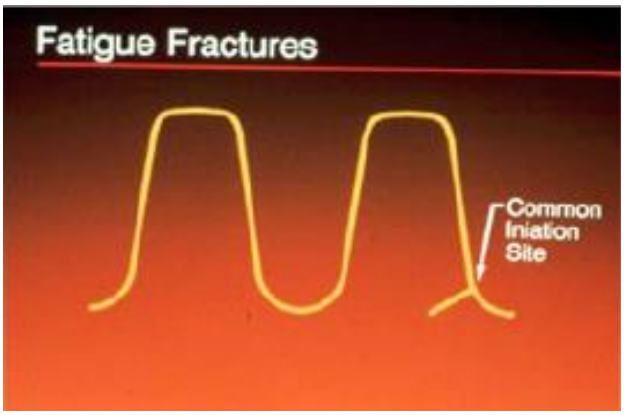


Figura 364

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

En este engranaje se han roto varios dientes y algunas son fracturas por fatiga tal como se evidencia por la presencia de marcas de la playa. La fractura por fatiga ocurrió primero en el diente central tal como nos indica la mayor proporción de fractura suave por fatiga y la pequeña proporción de la fractura final rugosa. Cuando este diente se rompió la carga aumento sobre los dientes de ambos lados (arriba y abajo).

Observe que la fractura del diente superior es mayoritariamente cristalina, rugosa y leñosa, con una pequeña porción de fractura por fatiga en la parte superior, indicándonos que la carga que rompió este diente fue principalmente por choque y sobrecarga. La fractura del diente inferior contiene algo de fractura rugosa y leñosa es sus extremos inferiores derecho e izquierdo.

Figura 365

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Una inspección más cercana y con mejor iluminación de la parte central de la cara de la fractura, nos muestra en forma más clara las marcas de playa y las marcas de trinquete que empiezan en el radio del filete del diente. Las marcas del trinquete nos revelan que ha habido esfuerzos de flexión considerables y que iniciaron varias rajaduras para aliviar estos esfuerzos. Debido a que los puntos de inicio de la fractura están en la superficie, sabemos que no fueron causadas por inclusiones o rajaduras previas. Debemos obtener evidencias sobre la aplicación de carga antes de sospechar que el engranaje estaba defectuoso.

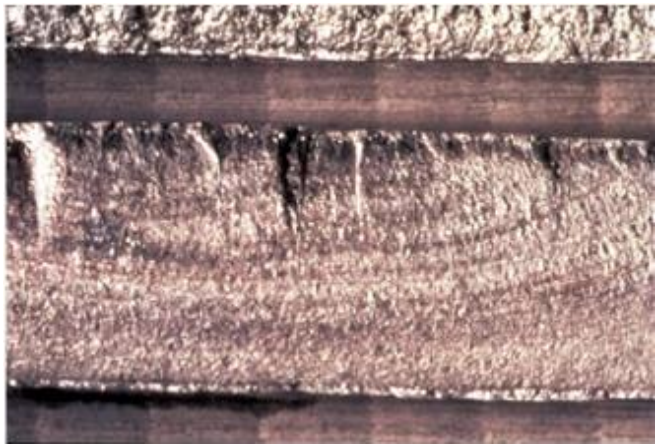


Figura 366

C<t.

Esta fractura por fatiga se inició en el filete de la raíz, en el lado superior izquierdo donde se inician las marcas de playa y las marcas de trinquete. El diente fue cargado solo en una dirección, tal como se evidencia por la ausencia de marcas de playa por flexión alternativa o por la fractura final de tipo dúctil en la parte superior. Luego debemos estudiar la zona de iniciación de la fractura para determinar si está presente

algún tipo de concertador de esfuerzos tales como ranuras, marcas, fallas de fundición, picaduras, etc. Si no se encontraran concertadores de esfuerzos, debemos centrarnos en investigar los hechos respecto a operación y aplicación. Por lo general este procedimiento nos conducirá hacia la causa raíz de la fractura por fatiga.

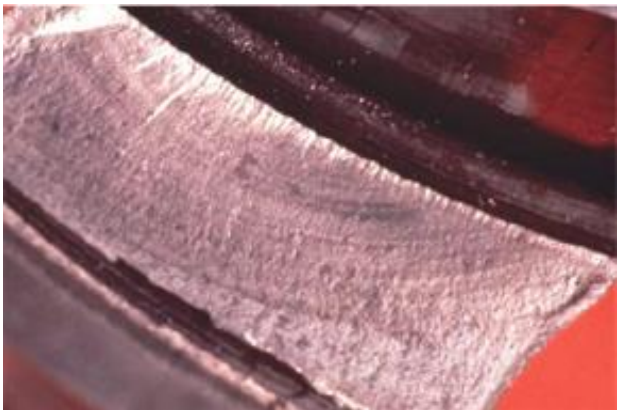


Figura 367

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Estos engranajes de transmisión fallaron después de solo unos cientos de horas de operación. Esta transmisión no tenía sincronizadores para facilitar los cambios de marcha. Los engranajes se enganchaban manteniéndolos uno en contra del otro mientras se aumentaba o disminuía la RPM hasta que los engranajes engancharan.

Figura 368

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

El cliente pensaba que la rotura del diente se debió a un debilitamiento del piñón o aun problema de manufactura.

Figura 369

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Una inspección más cercana con buena iluminación nos ayuda a observar una pequeña fractura por fatiga cerca de un extremo del diente, empezando desde el radio del filete del diente. Se observan marcas de trinquete y el desarrollo de marcas de playa hacia fuera, con una fractura final de tipo dúctil y frágil. Debemos sospechar de la presencia de una carga de flexión cíclica, severa y desalineada que concluyo en fractura.

Figura 370

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Los dientes del engranaje compañero muestran daños por impacto y desportillado en los bordes de ataque, contándonos la historia de la forma de enganche. Estas señales del camino nos dicen que busquemos evidencias acerca de la operación. De repente el operador está efectuando los cambios inadecuadamente, o de repente está tratando de hacer los cambios correctamente, pero el mecanismo de cambios no le permite tener buen control sobre los cambios.

Figura 371

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Si los dientes son sometidos a condiciones de sobrecarga, la flexión del diente bajo la carga puede producir un contacto desalineado. Estos dientes fueron sometidos a 40% de sobrecarga por encima de lo especificado por diseño, y después de unos ciento de horas de operación fallo un diente del piñón.

Figura 372

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Inspeccionando de cerca al diente, encontramos que se ha producido una fractura por fatiga, y que se ha iniciado en el talón (parte superior del diente en esta diapositiva). Aparenta haber algo de rugosidad en la esquina superior derecha de la fractura, indicándonos que pudo haber existido previamente alguna carga desalineada, picaduras o desprendimiento. El patrón de desgaste se observa normal en la parte posterior del diente vecino (la carga en la dirección opuesta fue normal), y aparenta no tener picaduras y grietas.

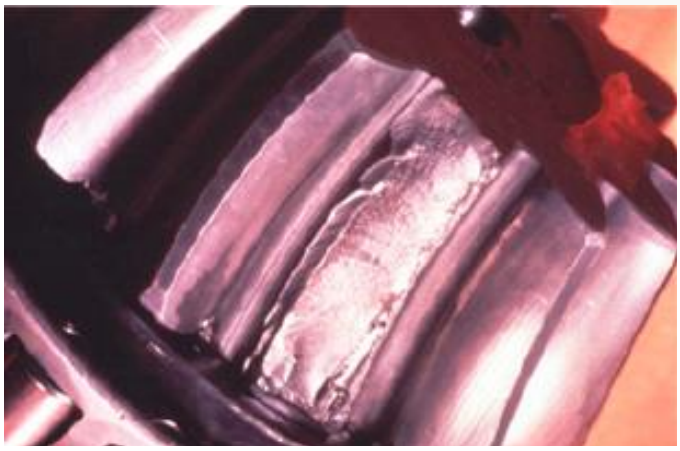


Figura 373

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Cambiando el ángulo de la iluminación y observando el otro lado de los dientes, encontramos que el patrón de desgaste es mucho más pronunciado en el lado del talón, y que se ha producido una línea de contacto fuerte (grietas, desportillados y picaduras).

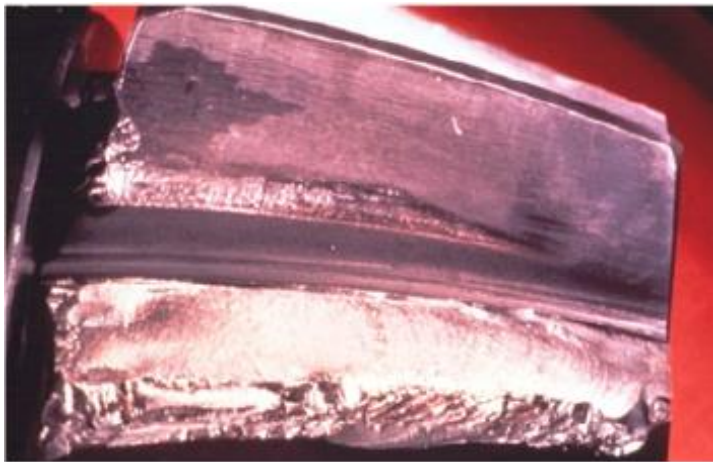


Figura 374

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Una inspección de los dientes de la corona compañera nos muestra que la punta del diente estuvo haciendo contacto lineal severo con el dedendum del diente del piñón.

Figura 375

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Una buena iluminación y mayor aumento nos ayudara a observar más claramente que se ha producido aplastamiento de la superficie. Observe la grieta en la cara del extremo la cual ha progresado hasta la mitad del diente. El 40% de sobrecarga puede explicar la razón del desalineamiento, el contacto lineal fuerte, el aplastamiento de la superficie y el desprendimiento.

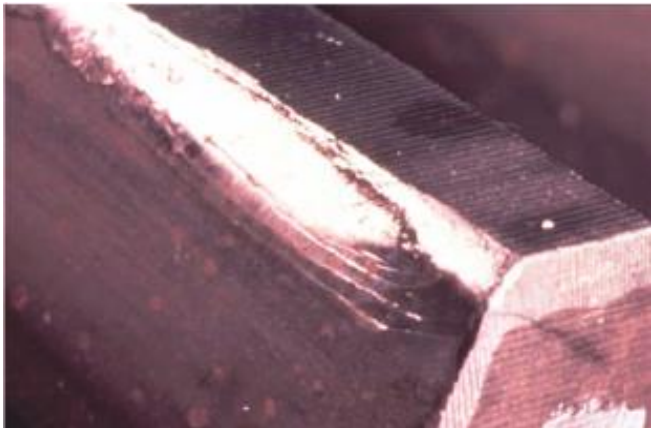


Figura 376

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Si los dientes operan con cargas normales, pero bajo condiciones de desalineamiento, se presentaran esfuerzos de flexión anormalmente grandes solamente en una parte del diente. Esto puede producir sobrecargas cíclicas y fracturas por fatigas en un extremo del diente, tal como observamos.

Figura 377

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Una buena iluminación y aumento visual nos ayuda a identificar las marcas de playa y las marcas de trinquete radiando desde el lado de inicio en el lado superior derecho del filete de raíz de cada diente. Estas señales de cambio nos dicen claramente que la carga ha estado corrida del centro, resultando en una fractura por fatiga. Necesitamos identificar la causa de este delineamiento.

Figura 378

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Fracturas dúctiles y quebradizas

Muchas fracturas de engranajes son el resultado de cargas de impacto o choque. Debemos recordar del primer módulo de este curso que las fracturas dúctiles son oscuras, rugosas y leñosas, y por lo general tienen labios de corte en la fractura final. Las fracturas dúctiles se producen cuando la sobrecarga es suficiente para fracturar el engranaje con una sola carga (de una sola vez). Las caras de la fractura serán leñosas en apariencia, usualmente se ven opacas y son rugosas al tacto.

Figura 379

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Observe que la superficie tiene una textura similar a la de un madero que ha sido partido. La apariencia leñosa que observamos es debida al deslizamiento y separación a lo largo de las líneas de flujo en el acero. Este engranaje fue fabricado partiendo de una barra que tiene flujo granular de lado a lado. Por lo general las fracturas dúctiles son resultados, indicándonos que debemos buscar la fuente de la sobrecarga.

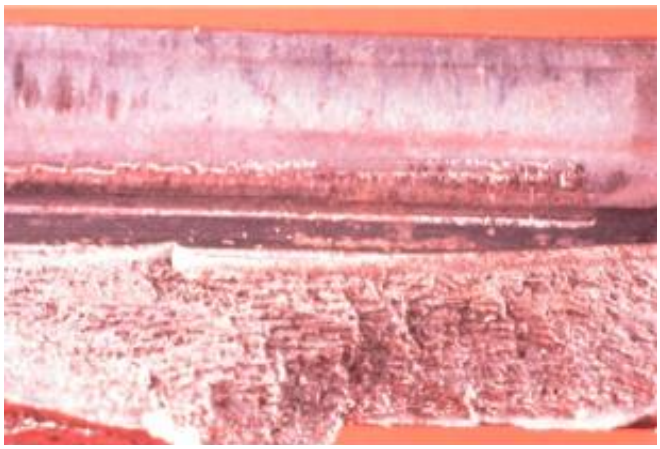


Figura 380

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Cuando el diente del engranaje es desprendido violentamente por una carga de impacto, por lo general se producen las características de una fractura frágil. El lugar donde se inicia la fractura tiene por lo general una apariencia cristalina, mientras que la parte del diente que se rompió al final muestra un corte, formando una depresión por compresión se encuentra en la parte superior de la fractura.

Figura 381

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Es fácil de observar la forma de una fractura frágil típica (causada por una carga de impacto) si observamos el diente desde un extremo. Acá la fractura inicial cristalina está a la izquierda y la fractura final (cresta por compresión debido al corte por impacto) está a la derecha.

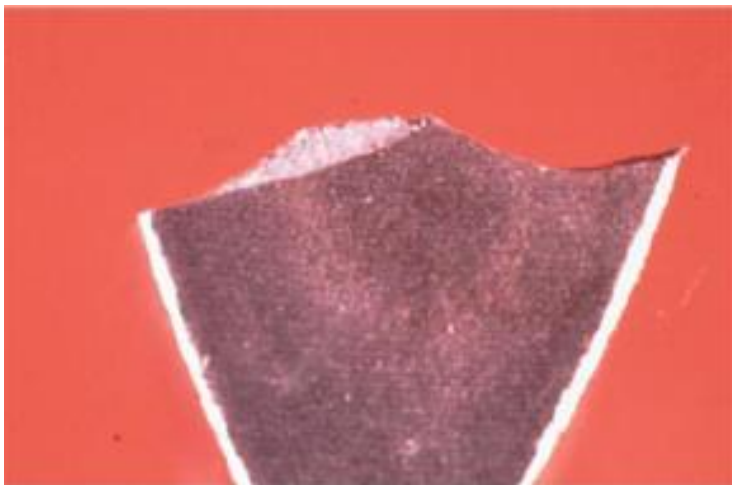


Figura 382

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Una inspección cercan de este tipo de fractura en el lado del cuerpo del engranaje nos ayuda a ver estas características más claramente. Observe que la cresta por compresión debida al corte por impacto en la parte superior, se pronuncia hacia el diente, y es mucho más suave que el área adyacente con fractura frágil/dúctil (parte inferior). Si la carga de impacto mayoría de la superficie de la fractura será dúctil, y la cresta por compresión será más pequeña.

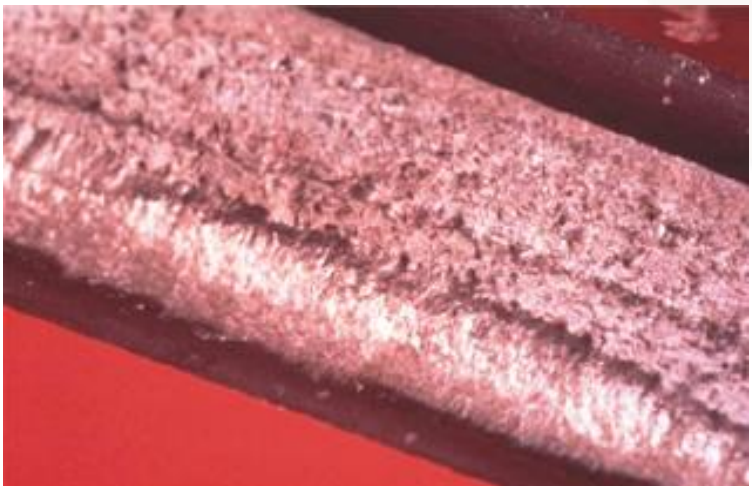


Figura 383

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Por lo tanto, ya sea cuando se aplica menos energía, o cuando la energía se aplica menos violentamente, los metales tienen la oportunidad de acomodarse a la carga durante la fractura. Esto puede producir una combinación de características dúctiles y frágiles con poco o nada de depresión por compresión. Acá observamos algo de espiguillas (característica de una fractura frágil), una joroba por compresión muy pequeña en la parte superior (corte por impacto), y una superficie dura bordeando la fractura.

Figura 384

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Otra señal del camino que debemos observar aquí es que las espiguillas apuntan al área central de la cara del engranaje, indicándonos que la fractura se inició allí y que la carga estuvo correctamente centrada en el diente. (Imagen invertida)

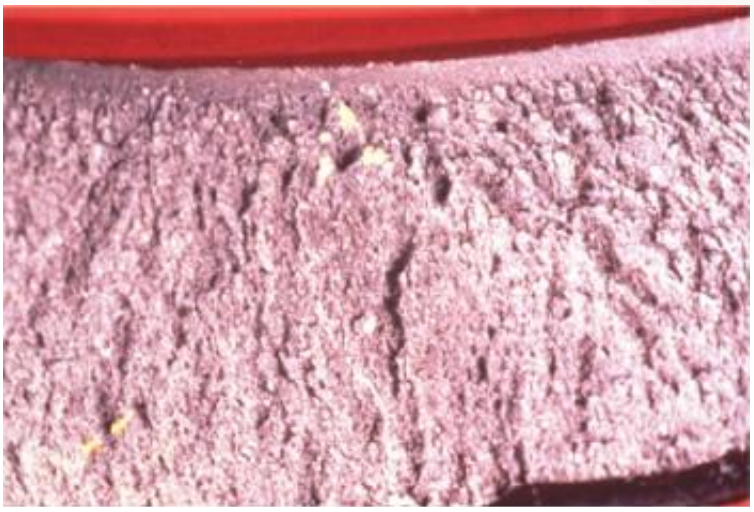


Figura 385

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Ejercicios de análisis de fracturas

Veamos algunas fracturas frágiles y/o dúctiles y practiquemos.

¿Qué tipo de fractura es esta?

¿Qué tipo de carga produjo esta fractura?

¿Dónde se inició esta fractura?

¿Hubo des alineamiento?

Figura 386

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

¿Qué tipo de fracturan es esta?

¿Dónde se inició la fractura?

¿Qué tipo de carga produjo esta fractura?

¿Qué puede haber producido el choque?

Figura 387

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Este diente fue encontrado en el depósito de aceite. La carga aparenta haber sido normal, pero aparecen algunas picaduras por corrosión.

Figura 388

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

El otro lado también muestra desgaste normal, excepto que hay varias rajaduras por debajo de la línea de paso y esta desprendido un gran trozo. Debemos inspeccionar las caras de la fractura.

Figura 389

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

¿Qué tipo de fractura es esta?

¿Dónde se inició la fractura?

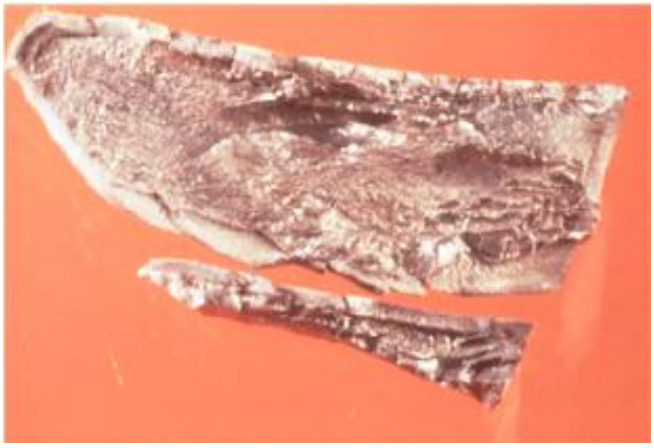


Figura 390

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Durante la instalación del componente conforme se apretón los pernos de montaje, los dientes del engranaje pueden ser forzados contra los dientes del engranaje compañero, y los dientes más débiles se desprenden. La fractura resultante muestra un corte por sobrecarga directa.

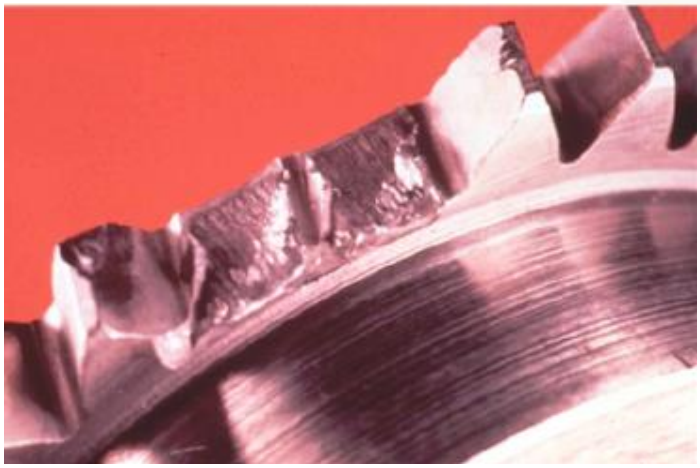


Figura 391

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Otras veces se puede encontrar daño parcial en los dientes debido al contacto de interferencia con el engranaje compañero durante la operación.

Figura 392

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

La inspección de cerca nos muestra que en el momento que el engranaje se corrió y los dientes hicieron contacto punta con punta, los dientes sufrieron deformación por impacto y corte, raspaduras, etc. Debemos seguir estas señales del camino para determinar por qué los engranajes se salieron de su posición.

Figura 393

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

La mayoría de los dientes que encontramos presentaban fracturas frágiles y dúctiles. Las cuales son el resultado de un daño previo en el compartimiento de los engranajes. Algunas veces, de todos los dientes estarán rotos o dañados por partículas autogenerada que entraron en el engranaje.

Figura 394

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

La inspección cercana de dichos dientes nos muestra por lo general fracturas brillantes, cristalinas y con depresiones por compresión, una muestra clara de las cargas de choque que se aplicaron sobre los dientes. Cuando el daño llega a esta situación, es más difícil encontrar señales del camino, que nos conduzcan a la causa raíz de la falla.

Figura 395

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Si identificáramos las características de la fractura, podremos clasificar el tipo de fractura y las cargas que la produjeron. Las fracturas por fatiga son suaves al tacto y comúnmente tienen marcas de playa y marcas de trinquete. Las fracturas frágiles son brillosas y cristalinas, mientras que las fracturas dúctiles son obscuras y leñosas. También hemos observado que encontrando el lugar de inicio de la falla (donde se inició las grietas) seremos guiados hacia la fuente del concentrador de esfuerzos, inclusiones, sobrecargas, des alineamiento, etc.

Problemas de los engranajes

Debido a su cuidadoso diseño, manufactura y control de calidad, los engranajes vez presentan problemas que puedan causar fallas. Sin embargo, debemos dar una breve mirada a los posibles problemas como inclusiones, pliegues de forja, problemas de tratamiento térmico, daño físico durante su fabricación o ensamble o errores de diseño.

La primera impresión que nos da este diente es que tiene un orificio, o vacío en la superficie. No hay evidencias de un pulimiento severo o rajaduras alrededor del hoyo que nos pueda sugerir una carga anormal.

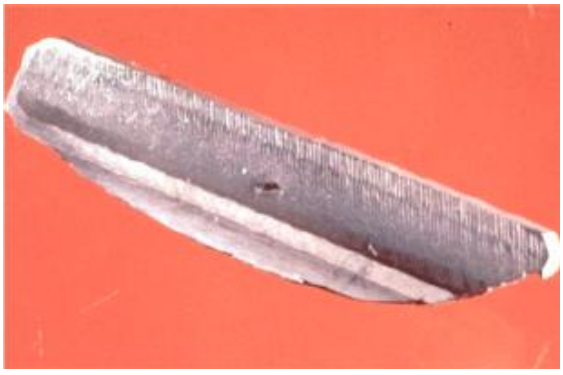


Figura 396

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Cuando volteamos el diente y observamos la cara de la fractura, vemos que el vacío (hoyo negro en el centro inferior) fue lo suficientemente grande para ser un concentrador de esfuerzos. A partir de este vacío se desarrolló una fractura por fatiga,

con una fractura final frágil con todo el rededor de la superficie del diente. Este vacío aparenta ser una inclusión de plomo, el cual desapareció durante el tratamiento térmico de nitrurizado. Algunas veces se utiliza algo de plomo en la aleación del acero de los engranajes que serán nitrurados, con el fin de hacerlos más maquinables.

Figura 397

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Este diente aparenta tener dos grietas importantes. Se aprecia algo de raspaduras debajo de la línea de paso, lo que es de esperarse con la seria fractura de este diente. Debemos observar cuidadosamente todas las superficies del diente para tratar de entender por qué se desarrollaron las grietas.

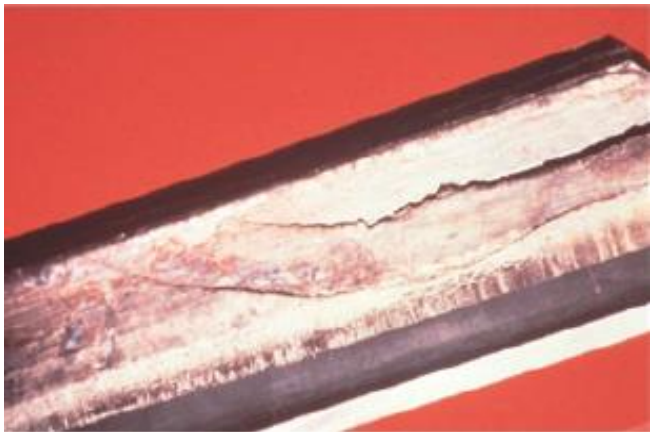


Figura 398

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Por el otro lado se ha perdido gran parte del diente, y aun a la distancia podemos observar marcas de playa que nos indican que se ha producido una fractura por fatiga.

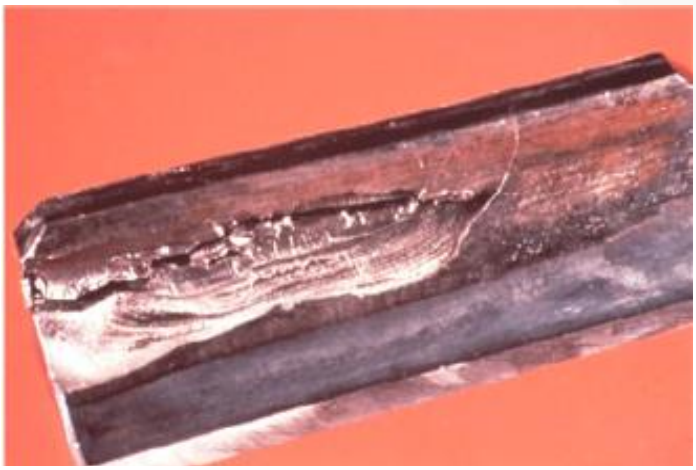


Figura 399

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Una inspección más cercana con buena iluminación nos señala que las marcas de playa provienen del interior del diente y que debemos examinar cuidadosamente esta área para determinar la causa de esta fractura por fatiga.

Figura 400

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Las marcas de playa de la parte superior irradian desde una inclusión no metálica que fue el concentrador de esfuerzos que inicio la fractura por fatiga. Habiendo limpiado bien la parte obscura, eliminando los residuos de aceite, usando buen aumento visual, fuimos capaces de ver claramente estas señales del camino que nos condujeron a localizar un problema en la estructura del metal.

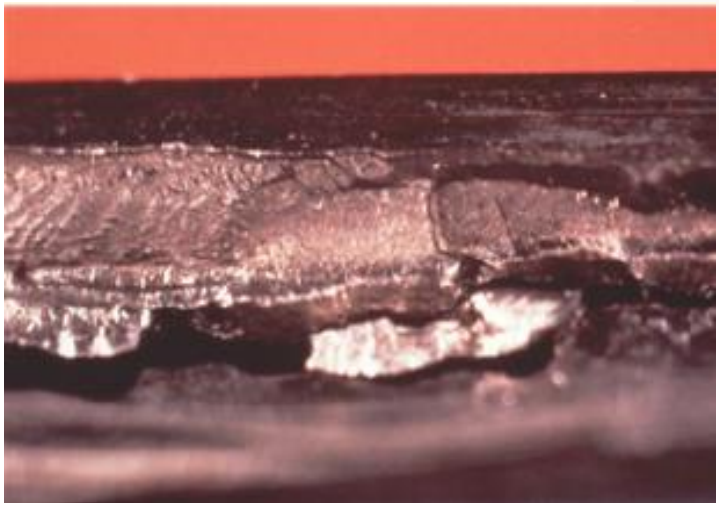


Figura 401

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Por lo general las inclusiones no son tan grandes como las que hemos visto. Y algunas veces la fracturas por fatiga no tienen marcas de playa tan evidentes como las que hemos visto recientemente, al respecto ¿puede usted ver alguna marca de playa en esta superficie de fractura? Todo lo que podemos observar acá es una superficie bastante suave excepto por algo de fractura rugosa al final de la fractura alrededor de los bordes superiores. Cambiando la iluminación y utilizando aumento es posible que veamos más claramente los detalles de la fractura.

Figura 402

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Si usamos buena iluminación en forma directa sobre la fractura, empezaremos a observar pequeñas marcas circulares de fatiga en la parte central inferior. La continuación de la fractura es más rugosa, indicándonos que progreso más rápido.

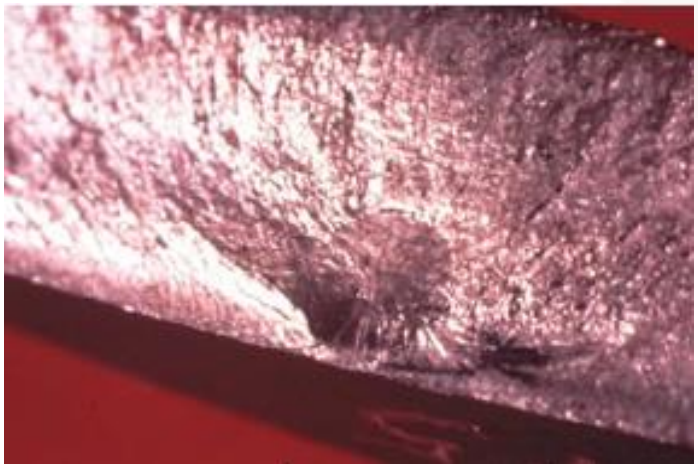


Figura 403

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Si utilizamos únicamente la iluminación de la habitación podemos observar un poco más claro la fractura circular por fatiga.

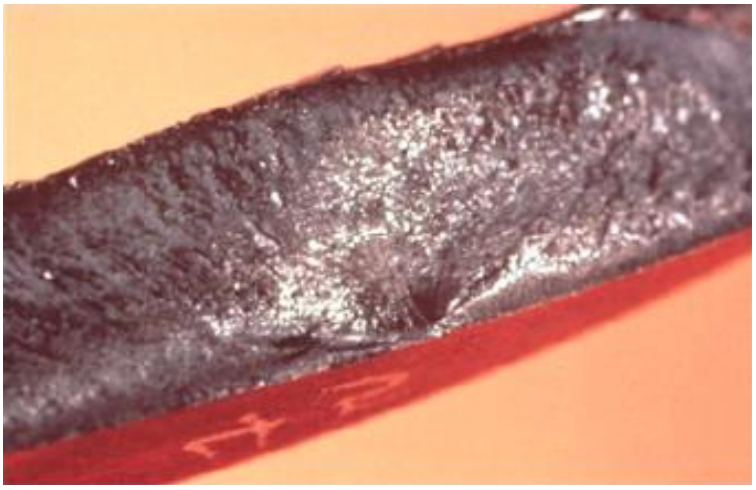


Figura 404

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Si utilizamos iluminación en diagonal, veremos fácilmente las marcas circulares de la fractura por fatiga de altos ciclos en la parte central inferior. Justo en el centro de la fractura circular existe una inclusión en el acero la cual actúo como concentrador de esfuerzo para iniciar la fractura por fatiga de altos ciclos por la parte interna. Cuando la fractura circular alcanzo la superficie en la parte inferior de esta diapositiva, la pieza se abrió y los esfuerzos se incrementaron dramáticamente. Ahora comenzó a progresar una fractura por fatiga de bajos ciclos (de rápido crecimiento) a través del diente. La marca circular del ojo de buey que observamos acá es típica de una fractura por fatiga superficial. Debemos estar seguros que las cargas estuvieron dentro de las recomendaciones de operación y aplicación antes de decidir que fue la inclusión la responsable de la falla.

¿Qué tipo de fractura es esta?

¿Dónde se inició la fractura?

Figura 405

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

¿Es esta una ubicación normal para un inicio de fatiga?

¿De qué sospecha usted que pueda haber iniciado esta fractura por fatiga? ¿Qué causo la fractura?

Figura 406

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Otros posibles problemas de los engranajes son los pliegues de forja y las rajaduras por templado. La mayoría de la superficie de esta fractura es de tipo dúctil revocada por una condición de sobrecarga. Pero observe que en la esquina superior derecha de la fractura tiene una textura diferente. Se encuentra presente una fractura semicircular o fatiga con marcas de trinquete, y encima del inicio de la fractura observamos un pliegue de forja o una fractura de temple que iniciaron la fatiga. Observe que existe una fractura similar en el siguiente diente. Los pliegues de forja se introducen el elaborar la rueda base, mientras que la fractura por temple es durante el tratamiento térmico.

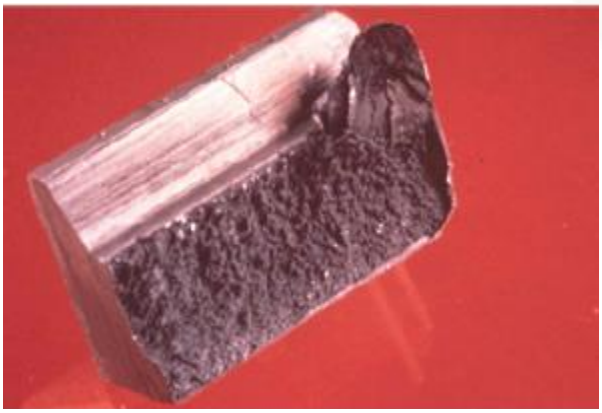


Figura 407

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Un tratamiento térmico inadecuado, también puede provocar que las puntas se quiebren. Este diente muestra desprendimiento de la punta lo cual debe a un excesivo carburizado y mucho espesor de la capa dura o superficial. El excesivo espesor de la superficie endurecida puede producir altas tensiones superficiales, y bajo carga, la resistencia a al fluencia del material es excedida creando una fractura superficial en la interfaces de la superficie y núcleo. Dependiendo de la carga, la punta puede saltar inmediatamente, o la grieta puede progresar y finalmente se separa.

Figura 408

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Una inspección cercana nos muestra una superficie plana en la interfaces del núcleo y la capa dura, lo cual es típico cuando se desprende la punta. La superficie endurecida es oscura mientras que el núcleo es claro. En la interfaces del núcleo y superficie se encuentran marcas de playa y marcas dentadas débiles, y la fractura por fatiga progreso hacia fuera a la superficie.

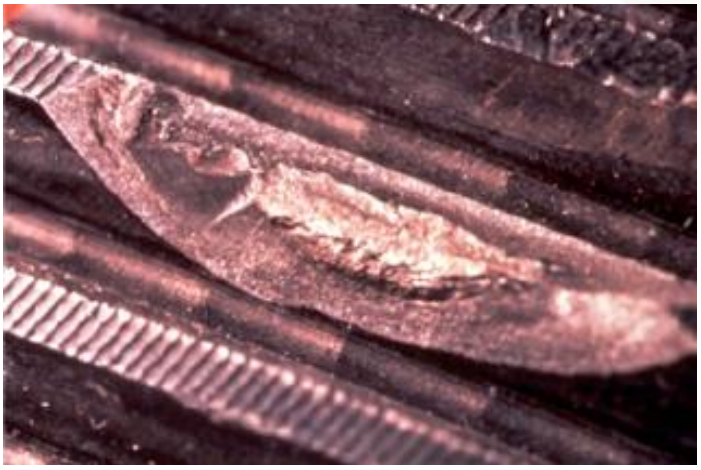


Figura 409

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Debido a la insuficiente dureza superficial se pueden producir picaduras uniformes. Puede ser que el contenido de carbono y la superficie sea muy pobre, la superficie se puede haber descarburizado y ablandado durante el tratamiento térmico, o puede ser que el tratamiento térmico haya sido incompleto. Observe que las picaduras de la superficie no tienen la forma de "V" tal como ocurre cuando la dureza superficial es la correcta. Y que las picaduras están distribuidas uniformemente en toda la cara del diente en lugar de estar concentrada en la zona de altos esfuerzos.

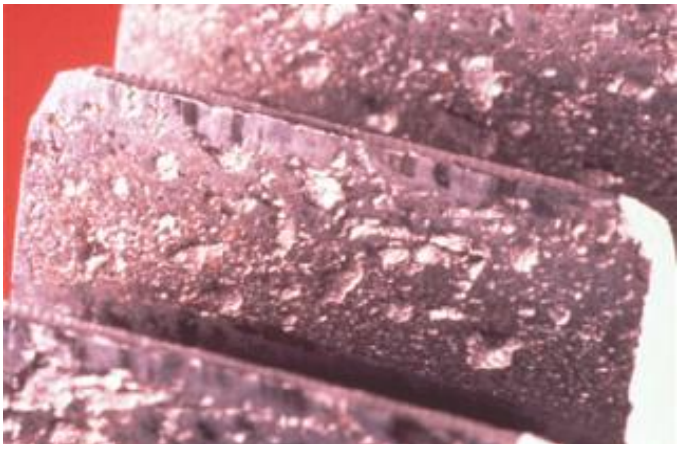


Figura 410

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

En raras ocasiones encontraremos que los dientes de los engranajes se han desgastados por completo. Debemos sospechar que el engranaje recibió un tratamiento térmico inadecuado y que los dientes fueron muy blandos. Podemos obtener una idea de la dureza del diente utilizando una lima. Por ejemplo, si podemos cortar fácilmente el metal con la lima será un indicativo de metal blando.

Si las fracturas superficiales y los desprendimientos se generalizan en forma paralela a la línea de paso, es probable que haya ocurrido aplastamiento de la superficie. Este es un indicativo que el diente no fue lo suficientemente fuerte para soportar la carga

aplicada. A pesar que sospechemos que existe un problema con el engranaje debemos recordar de hacernos la pregunta de doble verificación y ver si existe la posibilidad que alguien más haya provocado la falla. ¿Es el engranaje adecuado? , ¿Han sido las cargas muy elevadas? etc.

Algunas veces el daño físico produce concentradores de esfuerzo los que nos llevaran a la fractura del diente. En la cara de este diente no se observa desgaste anormal, pero se ha fracturado. Observe que existe una pequeña indentación circular en el extremo del diente. Enseguida, debemos observar la cara de la fractura y clasificarla.

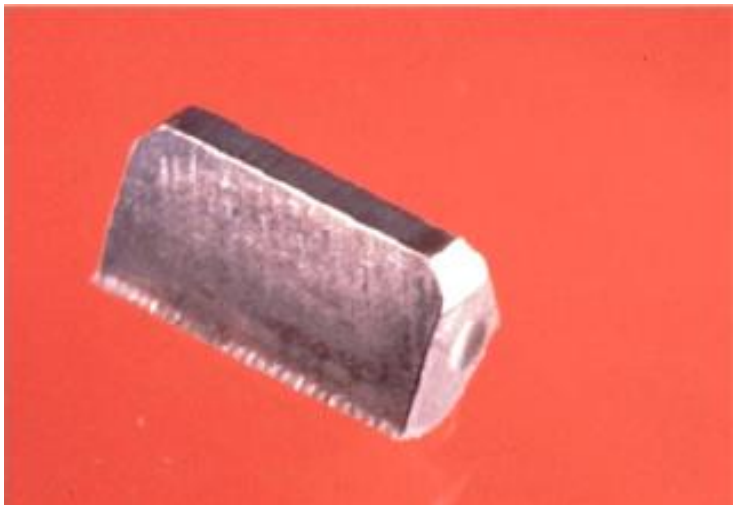


Figura 411

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Debido a que observamos marcas de playa y una superficie suave, sabemos que se ha producido una fractura por fatiga. La fractura final se encuentra en la parte inferior derecha, y el lugar de inicio en la parte superior izquierda.

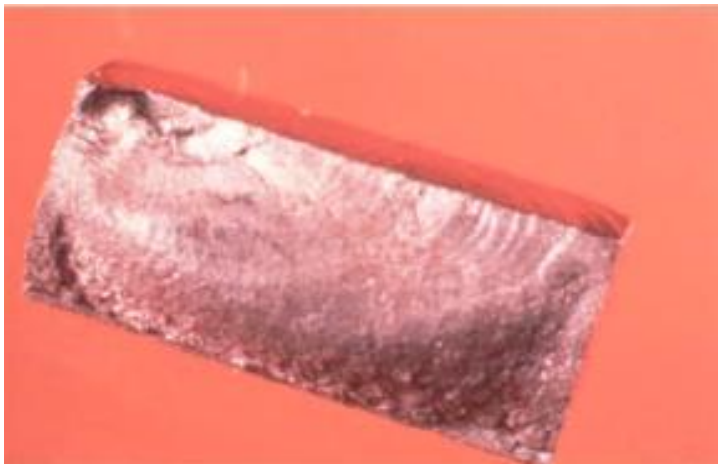


Figura 412

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Si observamos la cara de la fractura y estudiamos el lugar de inicio con aumento visual, observamos que la pequeña indentación circular a causadas pequeñas grietas en la

superficie endurecida, y que una de estas grietas actúo como concentrador de esfuerzo originando la fractura por fatiga. Hemos sido guiados por estas señales del camino para ahora investigar cómo y cuándo se produjo esta depresión circular. Se descubrió que se había efectuado una inapropiada prueba de dureza en este engranaje antes de ponerlo en servicio, y que fue el equipo de prueba el que produjo la depresión en la superficie y las grietas.

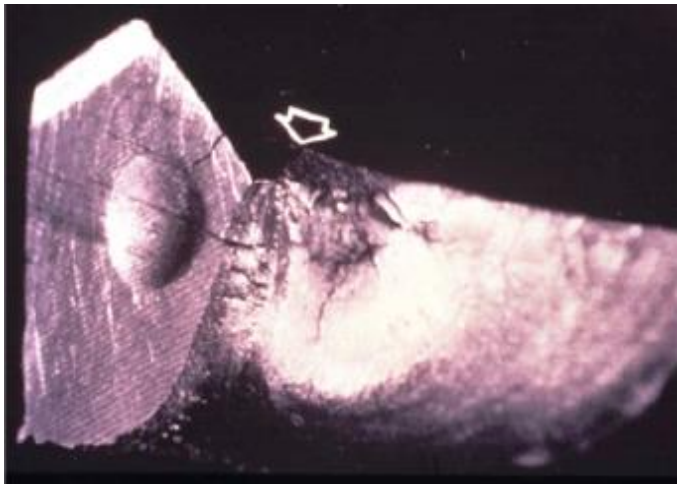


Figura 413

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Si tenemos la duda que el engranaje fue elaborado correctamente, existe una prueba rápida para determinar la dureza y su profundidad. La dureza se puede estimar tratando de pasar una lima por la superficie del engranaje .la mayoría de engranajes carburizados tienen una dureza tal que la lima no podrá cortar el metal ala aplicarla con una ligera presión. La profundidad de la superficie endurecida puede verse cortando un pedazo del diente, atacándolo con una solución de ácido nítrico y enjuagándola con agua.

Figura 414

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

El nital se elabora comúnmente con el 10% de ácido nítrico y el 90% de alcohol desnaturalizado. El nital se debe aplicar utilizando un isopo para evitar el contacto con

la piel y la ropa. Debemos además recordar que el ácido dañara las caras de la fractura y debemos tener cuidado si deseamos analizarlas en el futuro.

Antes que el nital sea aplicado, no existe evidencia de la profundidad de la superficie endurecida en esta sección de diente. El reactivo debe aplicarse por un minuto o dos, y luego enjuagarlo con agua.

Figura 415

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

Ahora podemos ver claramente que el engranaje fue tratado térmicamente. La profundidad de la superficie parece normal, y se ha producido una picadura dentro del recubrimiento endurecido. Posteriormente debemos observar las evidencias sobre el mantenimiento, operación y aplicación para encontrar una explicación a las picaduras.

Figura 416

(Por gentileza de Caterpillar Américas Co.)

CONCLUSIÓN

Debemos tener siempre cuidado de las ideas preconcebidas que nos conducirán a resultados y no la causa raíz.

Hay muchas razones para que falle un engranaje. Si recordamos de aplicar los 8 pasos del análisis de falla, identificando la causa de raíz de la falla y tomando las acciones correctivas, nuestro trabajo será más sencillo y preciso. Debemos obtener hechos o evidencias sobre la aplicación, operación, mantenimiento, y de las piezas falladas en sí.

Luego debemos pensar lógicamente con las evidencias hasta que entendamos cono se produjo la falla e identificar la causa raíz más probable. Luego será fácil comunicarse con la parte responsable, tomar la acción correctiva apropiada, y prevenir que la falla se repita

.Esto aumentara la satisfacción del cliente, tanto con el producto cono con el apoyo al producto. El aumentar la satisfacción del cliente nos ayudara a alcanzar nuestro objetivo principal: aumentar las ventas de equipos, repuesto y servicios.

Piense que todos tenemos una parte importante en el análisis de falla de un engranaje, el distribuidor tiene la función de liderazgo y es quien debe asegurarse que la causa raíz ha sido identificada y obtener su recompensa con los clientes.

Actividad N° 19

Introducción a la actividad:

Los participantes guiados por el instructor de manera individual, en pares o en grupos, deberán desarmar, identificar y armar componentes principales que forman el tren de potencia (Convertidor de torque, Transmisión, diferencial, mandos finales).

El objetivo de la actividad es familiarizar al participante con los distintos componentes que forman el tren de potencia: desarmando, identificando y armando en taller, esto será medido a través de una pauta de verificación.

Aprendizaje esperado que desarrolla

Identificar el funcionamiento del sistema de transmisión, basado en el manual del fabricante.

Estrategia metodológica para el instructor

Las estrategias son los procedimientos y/o recursos para promover el aprendizaje a través de actividades.
El instructor podrá realizar preguntas a los participantes en la medida que explica los distintos modos de fallas que pueden ocurrir en bombas y motores hidráulicos.

Recurso Plataforma Web	
Explicación demostrativa en aula	✓
Recurso Audiovisual	✓
Propuestas de situaciones problemáticas	
Formulación de Preguntas	✓
Taller de Trabajo	✓

Materiales y recursos

- Sala de clases
- Lápiz grafito
- Plumones
- Cuaderno del alumno
- Pizarra

- Borrador
- Proyector
- Transmisión
- Convertidor de torque
- Diferencial
- Mando final
- Kit de herramientas manuales según especificaciones
- Elementos de aseo
- Manual de servicio del equipo
- Elementos de protección personal

Desarrollo de la Actividad

El instructor deberá explicar el desarrollo de la actividad a realizar, anotando en la pizarra paso a paso el procedimiento para el desarrollo de la actividad.

El instructor deberá realizar preguntas a l participante a medida que vaya realizando la actividad, para medir el grado de conocimiento.

En la etapa de explicación de las características del desarme, identificación y armado, se deberá guiar con el manual del alumno y el instructor.

Para dar respuesta a las preguntas de la actividad el instructor previamente deberá explicar situaciones relacionadas con cada una de ellas mediante ejemplos.

Seguridad

En todas las actividades en salas de clases el instructor les debe explicar a los alumnos, los siguientes aspectos de seguridad:

- Identificar las vías de escape y conocer el punto de encuentro de emergencia.
- Reglas de higiene y seguridad dentro de la sala, como por ejemplo no ingerir alimentos dentro de esta.

Actividades

1. Realizar desarme de componentes que forman un tren de potencia (Convertidor de torque, Transmisión, Diferencial y Mando final) según procedimiento del fabricante.
2. Identificar los elementos primordiales que forman cada uno de los componentes principales de un tren de potencia (Actividad 2.1).
3. Inspección visual y medición del desgaste de los elementos de cada componente según pauta de mantenimiento del fabricante (tolerancias).
4. Ajustes y pruebas de verificación de funcionamiento aplicando y cumpliendo los procedimientos recomendados por el fabricante.
5. Realizar armado de componentes que forman un tren de potencia según procedimiento del fabricante.
6. Generar un informe técnico

Desarrollo de la Actividad

Los participantes a través de las imágenes expuestas o piezas reales deberán identificar y describir los elementos que son parte de los componentes principales de una transmisión.

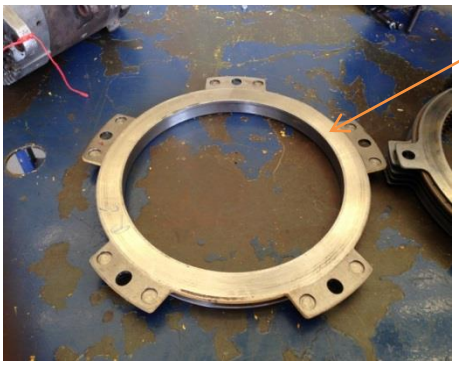
Participantes:

1.

2.

3.

4.



Pistón de transmisión planetaria

Platos de transmisión planetaria

Discos de transmisión planetaria

	Discos de transmisión planetaria Platos de transmisión planetaria Pistón de transmisión planetaria

Conclusiones finales del participante:

Nombre del instructor	Fecha	Firma

Observaciones

Desarrollo de la Actividad

Los participantes a través de las imágenes expuestas o piezas reales deberán identificar y describir los elementos que son parte de los componentes principales de un Convertidor de torque.

Participantes: **1.** **2.** **3.** **4.**	
	Cuerpo completo del convertidor de torque
	Impelente, bomba o impulsor Turbina Estator

Conclusiones finales del participante:		
Nombre del instructor	**Fecha**	**Firma**
Observaciones		

2.2 Desarrollo de la Actividad

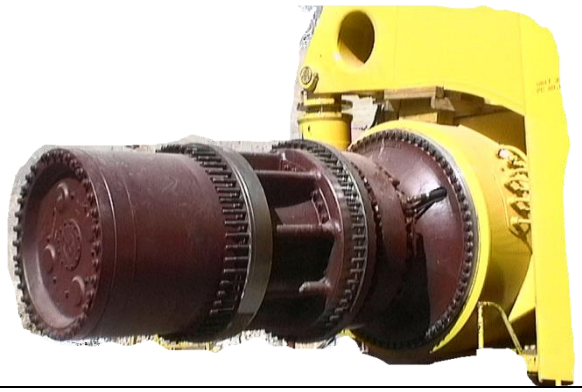
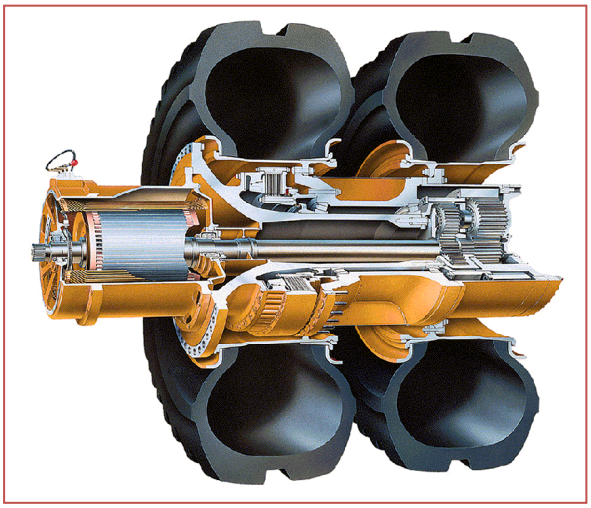
Los participantes a través de las imágenes expuestas o piezas reales deberán identificar y describir los elementos que son parte de los componentes principales de un Diferencial.

<table>
<tr><td colspan="2">Participantes:
1.
2.
3.
4.</td></tr>
<tr><td> </td><td>Cuerpo completo del diferencial</td></tr>
<tr><td> </td><td>Corona
Planetarios
Alojamiento de corona
Satélites
Entrada
Semieje</td></tr>
</table>

Conclusiones finales del participante:		
Nombre del instructor	**Fecha**	**Firma**
Observaciones		

2.3 Desarrollo de la Actividad

Los participantes a través de las imágenes expuestas o piezas reales deberán identificar y describir los elementos que son parte de los componentes principales de un Mando final.

Participantes: **1.** **2.** **3.** **4.**	
	Cuerpo completo mando final
	Carcaza mando final Neumáticos Eje mando final Conjunto de reducción planetaria (solar, planetario, anular o corona)
Conclusiones finales del participante:	

Nombre del instructor	**Fecha**	**Firma**
Observaciones		

Cierre:

El participante deberá preparar un informe ejecutivo y exponer en la sala de clases los resultados obtenidos y las conclusiones referentes al estado del sistema.

El informe debe contrastar los valores especificados con los valores reales obtenidos, a partir del análisis de los resultados el participante deberá entregar las recomendaciones necesarias para realizar otras pruebas de funcionamiento o simplemente indicar que el equipo se encuentra dentro de los parámetros normales de funcionamiento

El instructor deberá resaltar la importancia de la definición de los componentes mostrados

Actividad N° 20

Introducción a la actividad:

Los participantes guiados por el instructor de manera individual, en pares o en grupos, deberán preparar los documentos de solicitud de repuestos para realizar los mantenimientos, utilizando el manual de partes proporcionado por el fabricante.

El objetivo de la actividad es familiarizar al participante en la preparación de la documentación necesaria para solicitar un requerimiento de repuestos para un mantenimiento.

Aprendizaje esperado que desarrolla

Preparar documentos solicitando repuestos para realizar el mantenimiento, utilizando el manual de partes.

Estrategia metodológica para el instructor

Las estrategias son los procedimientos y/o recursos para promover el aprendizaje a través de actividades.
Explicación y demostración para que el alumno entienda en su totalidad el concepto o actividad estudiada.

Recurso Plataforma Web	
Explicación demostrativa en aula	✓
Recurso Audiovisual	✓
Propuestas de situaciones problemáticas	
Formulación de Preguntas	✓
Taller de Trabajo	

Materiales y recursos

- Sala de clases
- Lápiz grafito
- Plumones
- Cuaderno del alumno
- Pizarra

- Borrador
- Proyector
- Manual de operación y mantenimiento

Desarrollo de la Actividad

El instructor deberá explicar el desarrollo de la actividad a realizar, anotando en la pizarra paso a paso el procedimiento para el desarrollo de la actividad.

El instructor deberá realizar preguntas a los participantes a medida que vaya realizando la actividad, para medir el grado de conocimiento.

En la etapa de explicación de la forma de preparar la documentación necesaria se deberá guiar con el manual del alumno y el instructor

Para dar respuesta a las preguntas de la actividad el instructor previamente deberá explicar situaciones relacionadas con cada una de ellas mediante ejemplos.

Seguridad

En todas las actividades en salas de clases el instructor les debe explicar a los alumnos, los siguientes aspectos de seguridad:

- Identificar las vías de escape y conocer el punto de encuentro de emergencia.
- Reglas de higiene y seguridad dentro de la sala, como por ejemplo no ingerir alimentos dentro de esta.

ACTIVIDADES

1. Utilizando el manual de partes el alumno debe buscar el número de parte de un repuesto asociado al tren de potencia según la indicación que le brinde el instructor.

Nombre del alumno:		
Fecha:	Nota:	
ASPECTOS A VERIFICAR	SI	NO
• Sigue las indicaciones del instructor		
• Utiliza las herramientas que te brinda el manual (índice, sección).		
• Selecciona el manual correcto en base al número de serie del equipo		
• Cumple con el objetivo encomendado por el instructor		
Conclusiones finales del participante:		

Nombre del instructor	**Fecha**	**Firma**

Observaciones

Cierre de la actividad:

El participante deberá comprender la importancia de las herramientas que brinda cada fabricante para la ejecución de sus pautas de mantenimiento y la búsqueda y reemplazo de los diferentes repuestos.

El instructor deberá resaltar la importancia de la definición de los componentes mostrados

Actividad N° 21

Introducción a la actividad:

Los participantes guiados por el instructor de manera individual, en pares o en grupos, deberán definir pautas de mantenimiento objetivas para los diferentes elementos y componentes que forman un tren de potencia

El objetivo de la actividad es definir y conocer pautas de mantenimiento preventivo con el fin de mantener en óptimas condiciones los elementos y equipos

Aprendizaje esperado que desarrolla
Definir las pautas de mantenimiento preventivo aplicables al sistema de transmisión según especificaciones.

Estrategia metodológica para el instructor
Las estrategias son los procedimientos y/o recursos para promover el aprendizaje a través de actividades.
Explicación y demostración para que el alumno entienda en su totalidad el concepto o actividad estudiada.

Recurso Plataforma Web	
Explicación demostrativa en aula	✓
Recurso Audiovisual	✓
Propuestas de situaciones problemáticas	
Formulación de Preguntas	✓
Taller de Trabajo	

Materiales y recursos

- Sala de clases
- Lápiz grafito
- Plumones
- Cuaderno del alumno
- Pizarra
- Borrador

- Proyector
- Manual de operación y mantenimiento

Desarrollo de la Actividad

El instructor deberá explicar el desarrollo de la actividad a realizar, anotando en la pizarra paso a paso el procedimiento para el desarrollo de la actividad.

El instructor deberá realizar preguntas a los participantes a medida que vaya realizando la actividad, para medir el grado de conocimiento.

En la etapa de explicación de la forma de preparar la documentación necesaria se deberá guiar con el manual del alumno y el instructor

Para dar respuesta a las preguntas de la actividad el instructor previamente deberá explicar situaciones relacionadas con cada una de ellas mediante ejemplos.

Seguridad

En todas las actividades en salas de clases el instructor les debe explicar a los alumnos, los siguientes aspectos de seguridad:

- Identificar las vías de escape y conocer el punto de encuentro de emergencia.
- Reglas de higiene y seguridad dentro de la sala, como por ejemplo no ingerir alimentos dentro de esta.

ACTIVIDADES

1. Utilizando el manual de mantenimiento proporcionado por el fabricante, extraer las pautas de mantenimiento específicas para aplicar a los diferentes componentes, acá dejamos una pauta genérica para aplicar a los equipos.

Estándar Job		**Pauta de Mantenimiento**	**Horómetro**
Equipo Nº			**N° de personas**
Fecha			**Tiempo estándar**
O.T. Nº			**Tiempo real**
N° de Tarea			**Hora inicio**
N° de Tarea Mantención Programada			**Hora término**

Seguridad: hoja de inspección de riesgos con la participación de los ejecutantes, Bloqueo de fuentes de energía, barra de seguridad, Use elementos de protección personal, zapatos, casco, guantes y lentes;

Verifique que no se encuentre ninguna persona alrededor del equipo antes de poner en marcha y efectuar los movimientos

Riesgos : Quemaduras en manos y cuerpo en contacto con el motor, transmisión u otros componentes que toman temperatura; Proyección de flujo de aire o aceite hacia la cara; Golpearse con o contra los componentes en movimiento; Atrapamiento de manos o ropa en carriles en movimiento; Cortarse o pincharse las manos con hebras de acero de piolas o mangueras en mal estado; Atropellamiento; Colisión con otro equipo al efectuar pruebas de frenos; salida de equipos sin coleros, Caídas de mismo o distinto nivel, piso sucio, escalas, escaleras en mal estado

MANTENIMIENTO	SI	NO	OBSERVACIONES
Comprobar nivel de aceite hidráulico (convertidor)			
Comprobar nivel de aceite transmisión			
Comprobar nivel de aceite conjunto diferencial			
Comprobar nivel aceite mando final			
Verificar que no existan fugas de ningún tipo de			

fluido			
Verificar pernos de sujeción de los componentes principales (transmisión, mandos finales, PTO, motor de combustión, etc.)			
Verificar instrumentos de medición tales como: medidor de temperatura, medidor de nivel, medidor de presión, etc.)			

Cierre:

El participante deberá comprender la importancia de la ejecución de las pautas de mantenimiento logrando profundizar en la gran ventaja que produce estas herramientas de calidad provistas por los fabricantes.

El instructor deberá resaltar la importancia de la definición de los componentes mostrados

Consejo Minero
Dirección: Apoquindo 3500, Piso 7, Las Condes, Santiago.
Teléfono: (562) 2347 2200
www.ccm.cl

AngloAmerican

ANTOFAGASTA MINERALS

BARRICK

bhpbilliton
resourcing the future

CODELCO
Orgullo de Todos

COLLAHUASI

FREEPORT-McMoRan
COPPER & GOLD

GLENCORE

KGHM
POLSKA MIEDŹ S.A.

LUMINA
COPPER CHILE

Teck

YAMANAGOLD