

Los Efectos de Lubricación Elastohidrodinámica en la Fricción y la Selección de la Viscosidad

por Richard Widman y Omar Linares O.

En este boletín adicionamos a los conceptos tradicionales de Lubricación Hidrodinámica y Lubricación Marginal el concepto de Lubricación Elastohidrodinámica y su efecto en la fricción del motor y reductores que debería ser considerado para la selección de la viscosidad correcta.

Este es el Boletín #45 de nuestro programa de Boletines Informativos mensuales. Todos los boletines están disponibles en formato Acrobat pdf en www.widman.biz

Entendiendo la Lubricación de mecanismos

El propósito de la lubricación es la separación de dos superficies con deslizamiento relativo entre sí de tal manera que no se produzca daño entre ellas. Se intenta con ello que el proceso de deslizamiento sea con el rozamiento más pequeño posible. Para conseguir esto se intenta, siempre que sea posible, que haya una película de lubricante de espesor suficiente entre las dos superficies en contacto para evitar el desgaste.

Los cuatro conceptos básicos de lubricación son:

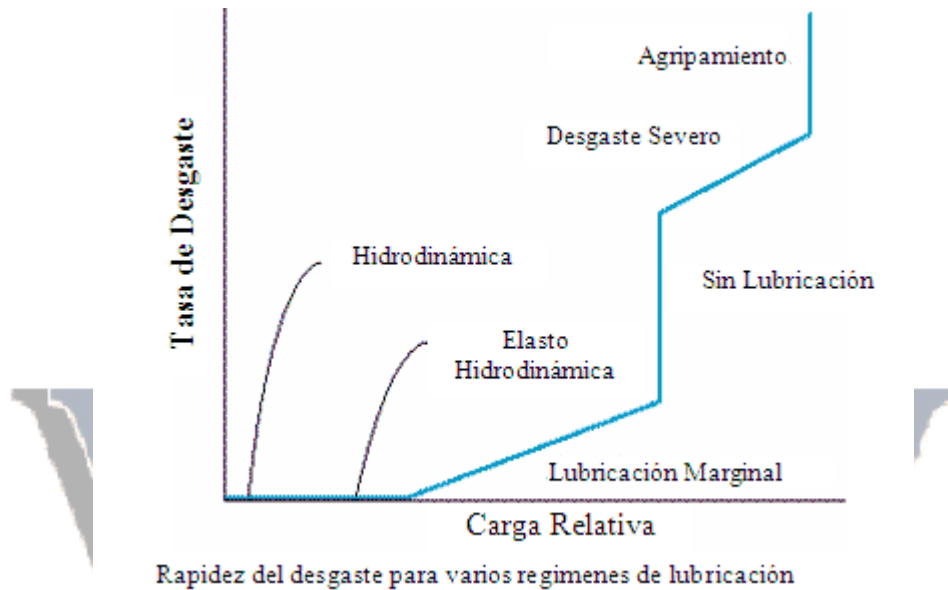
- **Lubricación Hidrodinámica:** Cuando la película de aceite forma un “colchón” de aceite que mantiene una separación entre piezas bastante gruesa para evitar contacto entre sus superficies. Aquí se evidencia que la viscosidad es el aspecto más importante del lubricante.
- **Lubricación Marginal (o Límite):** cuando se desplaza el aceite de las superficies en contacto tanto que las partes ásperas de las superficies pueden hacer contacto directo, entonces se necesita algún aditivo para evitar el desgaste severo y lograr reducir la fricción. Esto es el momento que necesitamos los aditivos polares o químicos para formar una barrera que reduce la fricción y el daño a las piezas.
- **Lubricación Mixta,** donde las piezas trabajan con algo de Lubricación Hidrodinámica y algo de Lubricación Marginal por falta de bastante velocidad o viscosidad para mantener su “colchón” completo.
- **Elastohidrodinámica:** El concepto de Lubricación Elastohidrodinámica es poco conocido. En términos simples, es cuando las superficies en contacto se deforman en forma elástica o sea que vuelven a su posición inicial y la película de lubricación atrapada entre las superficies provee una lubricación hidrodinámica microscópica. Aquí el espesor de la película lubricación puede ser $< 1 \mu\text{m}$.

El conocimiento del comportamiento del aceite mientras pasa por los cuatro estados naturales es crítico para seleccionar el aceite correcto para minimizar la fricción en nuestros motores y transmisiones, sean estos industriales o automotrices.

Un aceite típico para motores es formulado para proteger el sistema de válvulas, los cojinetes y el juego de pistones y anillos, ***aunque cada una de estas regiones requiere diferente protección.***

Lo mismo pasa con reductores, donde seleccionamos un aceite para proteger el perfil de los engranajes, pero también tiene que penetrar y lubricar los cojinetes, sincronizadores, o otras piezas de diferentes necesidades.

En el siguiente grafico podemos ver la tasa de desgaste de cada uno de estos conceptos. Esto muestra que la Lubricación Hidrodinámica y la Lubricación Elastohidrodinámica son donde básicamente se elimina el desgaste, mientras la Lubricación Marginal tiene algo de desgaste y el trabajo sin lubricación tiene una relación directa hasta “agriparse”.



- Si escogemos la viscosidad correctamente, los cojinetes del motor operan casi siempre con lubricación hidrodinámica, donde una película de aceite separa las superficies y no hay como se gasten. Entre más delgado el aceite, menos fricción, menos temperatura, y menos desgaste. Un aceite grueso causa mayor fricción.
- Cuando los pistones están brevemente parados, el “colchón” de aceite puede bajar aproximadamente al grosor de las asperezas de las superficies. En estas circunstancias, tenemos lubricación mixta, donde existe algo de contacto, y los aditivos se combinan con la viscosidad para proveer protección.
- Si es que la película baja a menos que las asperezas de las superficies, estas se rozan constantemente, demandando una buena lubricación marginal, que viene de los aditivos anti-desgastes. El contacto entre el árbol de levas y los balancines siempre está entre lubricación marginal y lubricación mixta.
- Frecuentemente los pistones y anillos trabajan en un rango de alta presión donde las piezas son apretadas con tanta fuerza que su lubricación es Elastohidrodinámica. Lo mismo pasa en el tren de válvulas de motores de alta compresión. *En esta forma de lubricación, el aceite es transformado brevemente a un lubricante sólido suficientemente fuerte para deformar las superficies.*

Podemos ver en este gráfico los coeficientes de fricción de estas tres formas de lubricación. El mejor coeficiente de fricción es provisto por la Lubricación Hidrodinámica. La Lubricación Elastohidrodinámica nos ayuda a reducir la fricción, evitando el punto de contacto donde entraríamos a una Lubricación Marginal cuando se escurre el aceite y terminamos sin la película lubricante.

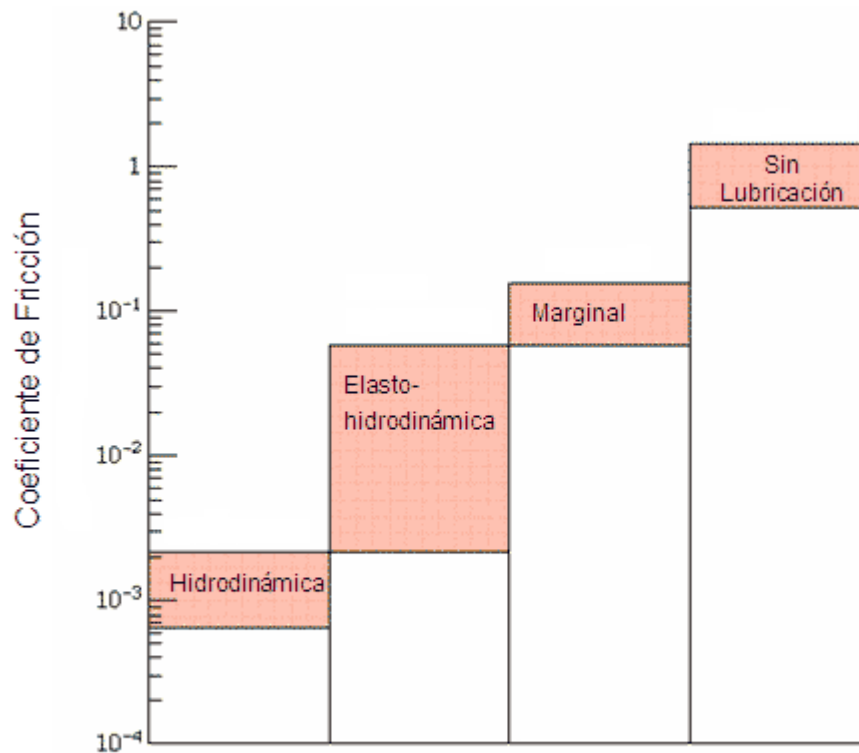


Diagrama de barras que muestra los coeficientes de fricción para varias condiciones de lubricación

El concepto básico

El principio que tenemos que comprender es básico. Toda sustancia puede existir en tres formas: Gas, líquido, o sólido. La diferencia entre las tres depende de la temperatura y la presión presente.

- El agua, a temperatura del ambiente en nuestro país normalmente se encuentra en forma líquida, pero si bajamos la temperatura, se vuelve sólida (hielo). Si lo calentamos, se vuelve un gas (vapor). También podemos causar o ayudar su transformación a un gas al reducir la presión alrededor o creando un vacío. Es por esto que el agua evapora a menos temperatura en alturas que al nivel del mar.
- El CO_2 , que conocemos como un gas, puede ser comprimido o enfriado para formar un líquido, o más aún a un sólido, conocido comúnmente como hielo seco.
- El hierro, que conocemos como un sólido, puede ser calentado a un líquido (cerca de 1400°C), o un gas (normalmente hecho con una combinación de temperatura y vacío).

Lo mismo pasa con un aceite. Lo conocemos como un líquido, pero puede evaporar para formar varios gases, o puede congelar, y puede solidificarse si aplicamos bastante presión. Las temperaturas donde evapora o congela dependen de sus componentes específicos. Aceite es una combinación de moléculas diferentes, cada cual tiene sus características.

Un aceite con un alto contenido de moléculas livianas evaporará más rápidamente que uno con moléculas pesadas o saturadas.

- Dentro de las pruebas de aceites del API o ACEA, existe la prueba NOAK, donde se mide la evaporación del aceite a 250°C .

- La norma SAE J300 provee los límites de fluidez que el aceite de motor tiene que mantener en frío (vea www.widman.biz para la tabla).
- Para entender el concepto de lubricación elastohidrodinámica tenemos que entender que la compresión de un líquido tiene el mismo efecto que la reducción en temperatura. Entre más presión aplicamos, más denso se pone su estructura molecular, llegando a formar un sólido.

El comportamiento de la película de aceite atrapado entre dos superficies en movimiento se identifica por su viscosidad dinámica, medida en mPa (Mega Pascales); aunque en realidad la viscosidad dinámica es relacionada con la fuerza de estrés, las características de cizallamiento y la fuerza aplicada. En la práctica, es más común expresarla como viscosidad cinemática (viscosidad cSt o CentisToke, mm²/seg), la cual es la viscosidad dinámica dividida por la densidad del aceite.

Los lubricantes entran básicamente en dos categorías; los monogrados y los multigrados, dependiendo de su habilidad de mantener su viscosidad con cambios de temperaturas. Si miramos un SAE 10W-30 multigrado, vemos que 10W refiere a la viscosidad dinámica medido en frío, y 30 refiere a la viscosidad cinemática a 100° C.

Es importante entender que la idea de subir la viscosidad para aumentar lubricación hidrodinámica **aumenta fricción** y **consume más combustible**. En términos generales la energía perdida por fricción varía con la raíz cuadrada de la viscosidad. Observamos en la tabla siguiente la diferencia entre la resistencia de diferentes aceites a 15° C:

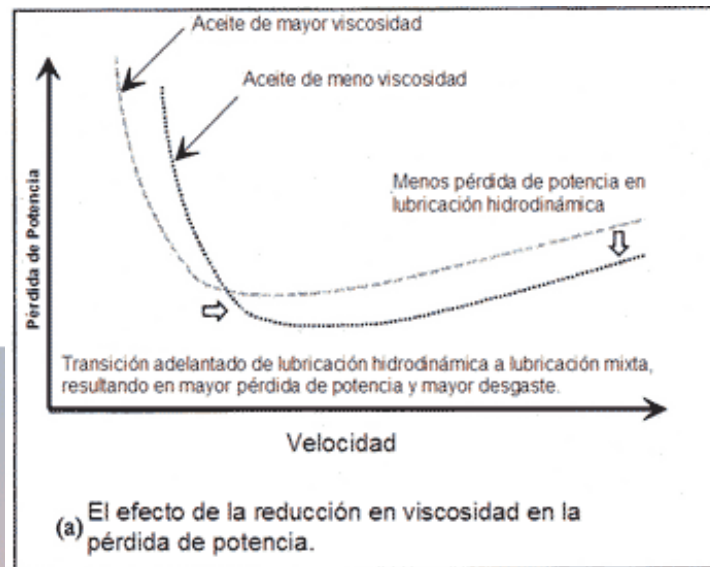
Grado SAE	Viscosidad Cinemática a 40° C (cSt)	Viscosidad Cinemática a 100° C (cSt)	Viscosidad Dinámica a -15° C (mPa s)	Pérdida de Energía por Fricción Comparado con el SAE 20W-50
SAE 30	91.3	10.8	3950	67%
SAE 20W-50	144.8	17.8	5870	Base de comparación
SAE 15W-40	114.3	14.9	2940	50%
SAE 10W-30	72.3	10.8	1900	32%
SAE 5W-30	57.4	9.9	1090	19%
SAE 0W-20	44.4	8.3	690	12%

Mirando esto, podemos ver que el uso de un SAE 20W-50, en un motor donde el fabricante recomienda SAE 10W-30, resulta en un aumento de fricción de 300%. O sea, si estamos usando el aceite SAE 20W-50 y cambiamos a un SAE 10W-30, reducimos la fricción (perdida de potencia) a 32% de lo que era.

La única consideración en hacerlo es por el desgaste que **hemos causado** en los cojinetes por el uso de aceite muy grueso. Cuando no seguimos las recomendaciones, podemos causar daños significativos. Entre más rápido cambiamos a la recomendación correcta, menos daños hacemos al motor o transmisión.

Podemos ver por la siguiente tabla que entre menos viscoso el aceite, menos fricción tendremos por el aceite, y menos consumo de energía. Solamente tenemos que considerar la viscosidad necesaria para proteger las piezas, tomando en cuenta sus asperezas.

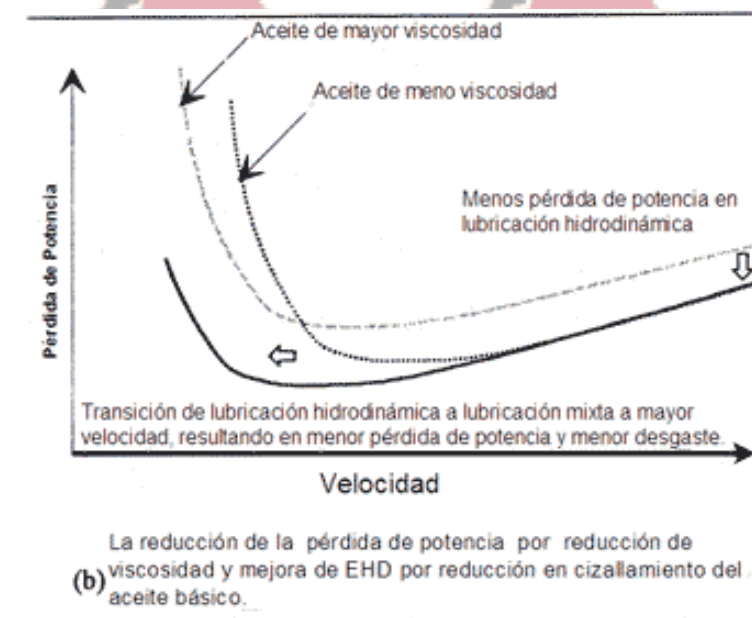
Aquí podemos ver el efecto de una alta viscosidad en la pérdida de potencia (energía o fuerza). A una velocidad muy baja, ganamos potencia con un aceite de mayor viscosidad, pero al subir la velocidad de las piezas las líneas se cruzan y perdemos potencia. Es por esto que buscamos aceite viscoso para engranajes de baja velocidad y aceite de delgado para todo lo que opera a altas velocidades.



El motor del auto opera en baja velocidad cuando lo arrancamos. Para los conceptos de lubricación, inmediatamente sube a altas revoluciones, aunque este en ralentí.

El efecto de la Lubricación Elastohidrodinámica

En el siguiente cuadro podemos ver la protección que da la lubricación elastohidrodinámica a esta misma curva y la reducción en pérdida de potencia.



El efecto de la Lubricación Elastohidrodinámica reduce la pérdida de potencia por baja viscosidad ***al mismo tiempo que reduce la fricción por baja velocidad.*** Esto actualmente protege las piezas con mucho menos velocidad que la Lubricación Hidrodinámica, reduciendo la dependencia en la Lubricación Marginal y Lubricación Mixta para proteger el equipo.

El conocimiento de este concepto nos ayuda a bajar la viscosidad del aceite para bajar la fricción y ganar potencia, mientras subimos la protección al equipo.

Para que funcione con el mínimo de desgaste, necesitamos un lubricante entre el eje de levas y los balancines para operar las válvulas, necesitamos una película de aceite entre los anillos y los cilindros para sellar contra las presiones de la cámara de combustión y para minimizar la pérdida por fricción. Adicionalmente necesitamos un “colchón” de aceite en los cojinetes para que no se raspen las piezas, y una circulación suficiente para eliminar el calor generado por la combustión y la fricción.

El peligro del cizallamiento

Es importante considerar la cantidad de polímeros utilizados para convertir un aceite monogrado (Índice de Viscosidad ± 100) a un aceite multigrado (Índice de Viscosidad $\pm 140^1$). Un aceite sintético tradicional típicamente no utiliza polímeros, por tener un índice de viscosidad natural bastante alto. Un aceite API grupo I típicamente empieza con un índice de viscosidad < 90 , necesitando un nivel alto de polímeros. Cuando el aceite entra en presiones medianas y altas, estos polímeros se alinean, aplastándose, o cizallando. Esto reduce su viscosidad efectiva. Esto se mide en la prueba ASTM D5481 de cizallamiento (HT/HS). Cuando se reduce la presión, el aceite vuelve a su viscosidad original. Un aceite con alto cizallamiento no provee la protección necesaria en estas regiones del motor, aunque provee la misma resistencia y consumo de energía en otras regiones. Entre más alta la calidad del aceite básico, menos polímeros son usados para mantener la viscosidad.

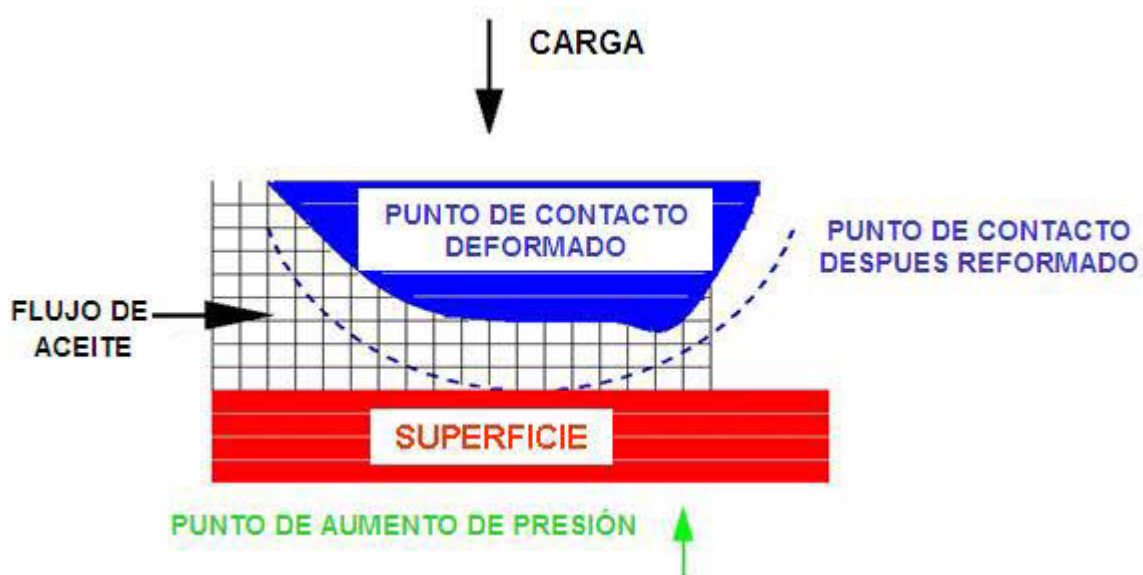
El efecto de la presión

Los estudios de tribología determinaron que la *viscosidad del aceite varía con la presión*, tal como todos los otros elementos. Actualmente, si comparamos la viscosidad de un aceite a presión atmosférica con la viscosidad del mismo aceite bajo 500 MPa, encontramos que esta presión sube la viscosidad entre 10,000 y 100,000 veces. Esto es conocido como la ley de Barus, que dicta que “la viscosidad incrementa exponencialmente con el aumento de presión”. Esto continúa hasta formar un sólido. Cuando el lubricante típico llega entre 2 y 4 GPa, se convierte en un lubricante sólido más duro que el vidrio, ***que deforma el metal en lugar de fluir.*** Esto se llama lubricación elastohidrodinámica.

En este punto de presión, el grosor de la película del lubricante se mantiene aunque se aumenta presión, y se deforma la superficie lubricada.

En el siguiente cuadro podemos ver la deformación de la pieza cuando se solidifica el aceite al pasar por el punto de alta presión.

¹ *Nota: Existen algunos aceites “Multigrados” en el mercado con un índice de viscosidad de 115. Mientras esto técnicamente es un multigrado, no ofrece los beneficios de un buen multigrado.



La Lubricación Elastohidrodinámica ocurre en el tren de válvulas del motor, el diferencial, reductores, y rodamientos de ruedas donde hay altas presiones. Ocasionalmente los anillos trabajan con lubricación elastohidrodinámica. Es la protección que tenemos cuando suben las presiones entre piezas y una de las razones que podemos cambiar nuestros conceptos de viscosidad, aceptando aceites de menor viscosidad y todavía tener protección.

Resumen

La definición de la lubricación elastohidrodinámica se puede explicar así:

- **Elasto:** Elasticidad, ó sea que la cresta de la irregularidad en el momento de la interacción con la cresta de la otra superficie se deforma elásticamente sin llegar al punto de fluencia del material.
- **Hidrodinámica:** Una vez que ocurre la deformación elástica, la película de aceite que queda atrapada entre las rugosidades forma una película hidrodinámica de un tamaño microscópico mucho menor que la película hidrodinámica propiamente dicha.
 - o En la lubricación hidrodinámica el espesor de la película lubricante puede ser del orden de 5 μm en adelante, mientras que en la lubricación elastohidrodinámica es de 1 μm ó menos.

Normalmente esta lubricación está asociada con superficies no concordantes y con la lubricación por película fluida.

Si tomamos en cuenta las cuatro formas de lubricación cuando buscamos el aceite para el motor, reductor, compresor o lo que sea, podemos escoger una viscosidad que reduce el consumo de energía o combustible mientras minimizamos el desgaste.

Si solamente buscamos viscosidad para maximizar la lubricación hidrodinámica, aumentamos la pérdida de potencia, consumiendo más energía, y probablemente gastando piezas donde no puede fluir correctamente el aceite.

Si entendemos cada uno de estos conceptos, podemos empezar a confiar en las recomendaciones de los fabricantes de utilizar viscosidades menores como los SAE 5W-30 y

10W-30 en motores y SAE 75W-90 en transmisiones manuales sin preocuparnos de la protección de las piezas que no tienen lubricación hidrodinámica constante.

Si buscamos el mejor aceite básico para evitar cizallamiento, podemos mejorar el colchón de la película hidrodinámica y las características de la película elastohidrodinámica, minimizando los contactos de las superficies rugosas, reduciendo la dependencia en aditivos de extrema presión o anti-desgaste, mientras reducimos la fricción y aumentamos la potencia.

Hasta que aceptemos estos conceptos, estaremos condenados a pagar más para energía, gastar la potencia en mover piezas sobrecargadas con lubricante grueso, y reemplazar piezas con más frecuencia, aumentando nuestros gastos de mantenimiento.

En el proceso de proyección de elementos lubricados de una máquina o instalación, el lubricante ha de ser considerado como un elemento funcional integrado y será introducido en la problemática general de la proyección mecánica atendiendo a los criterios de rozamiento y desgaste. La vida útil de los elementos lubricados en una máquina depende principalmente de la concepción y optimización del lubricante, considerando a éste como un elemento más de la construcción o del equipo.

Widman International SRL contribuye a la capacitación de los ingenieros y usuarios en Bolivia para mejorar su competitividad. Para mayores informaciones prácticas, visite nuestra página Web: www.widman.biz

Si usted conoce a otra persona que estará interesada en recibir estos boletines, favor responder al scz@widman.biz recibir estos boletines mensualmente, favor responder al scz@widman.biz con “**remover**” en el asunto.

La información de este boletín técnico, es de única y completa propiedad de Widman International S.R.L. Su reproducción solo será permitida a través de una solicitud a scz@widman.biz no permitiendo que esta altere sus características ni su totalidad.