

# La microfiltración para el ablandamiento de la segunda etapa proporciona muchos beneficios a una planta de ensamble de automóviles en México

Por:

George C. Patrick, Patrick Engineering Associates, Inc.\*

Gloria Garza, asesora

Claudia Aguilar, General Motors de México

Larry Krzesowski, General Motors

Stan Kars, US Filter

\*

5870 Clinchfield Trail, Norcross, GA 30092, EE. UU.

Georgepatrick@aol.com

## RESUMEN

General Motors de México (GMM) posee y opera una planta de ensamble en Silao, México. La planta está ubicada en la región árida y a aproximadamente a 350 km del noroeste de la Ciudad de México. La fuente del suministro de agua son seis pozos ubicados en el sitio de GMM. El agua de pozo está caracterizada como moderadamente dura, con la presencia de calcio y magnesio. También contiene una alta concentración de sílice disuelta.

Debido a una expansión inminente de la planta de ensamble en 1999 y los planes de crear una nueva planta de motores en 2001, GMM inició un Proyecto de gestión del agua (WMP) en 1997. El proyecto incluyó la conservación del agua y la expansión y actualización de las instalaciones de tratamiento de agua residual y agua existentes. Este documento se centra en la expansión y actualización de la planta de tratamiento del agua.

Antes del WMP, la planta de Silao utilizó ablandamiento de una etapa con cal. Los componentes clave de la planta de tratamiento del agua eran dos clarificadores de contacto de sólidos (SCC). Los SCC operaban a un pH de 10 con el agregado de cal. El afluente del clarificador se neutralizó al usar ácido sulfúrico y luego se filtró, desinfectó y almacenó en un tanque de almacenamiento (de agua potable). El lodo generado en el reactor o los clarificadores se bombeó a un tanque de retención de lodo y luego, se deshidrató mediante una prensa de filtro de placa y marco. El sistema de tratamiento era efectivo en la eliminación de calcio del agua freática. Sin embargo, la sílice y el magnesio solo se eliminaron parcialmente mediante el sistema de tratamiento.

La actualización centrada en mejorar la eliminación de la dureza total (por ej., magnesio) y sílice, mientras se emplean dichos procesos que conservaban el agua y minimizaban la generación de agua residual. Para determinar las condiciones óptimas, se realizaron pruebas piloto y de laboratorio. Las pruebas determinaron que se necesitaba un proceso de ablandamiento de dos etapas para lograr los requisitos de calidad del agua de GMM. El proceso de dos etapas se realizó al instalar equipos de microfiltración y recarbonización de manera descendente de uno de los SCC y al operar el proceso de ablandamiento de la primera etapa a un pH de 11,5. El otro tren de ablandamiento permaneció como un ablandamiento de una etapa al operar a un pH de 10. El sistema de dos etapas produjo un suministro de agua bajo en calcio, magnesio y sílice. Esto permitió a GMM minimizar la purga de los equipos del proceso y conservar el agua.

## **PALABRAS CLAVE**

Automotriz, ablandamiento, microfiltración, sílice, calcio, dureza, México, dos etapas, pretratamiento de OI

## **ÍNDICE**

Introducción

Antecedentes

Metodología

Resultados

    Diseño conceptual

    Adquisición y construcción de equipos

    Funcionamiento

Discusión

Conclusiones

## **INTRODUCCIÓN**

Las instalaciones de tratamiento de agua residual y agua original se instalaron en la planta de Silao en 1994. El proceso de tratamiento del agua empleó un ablandamiento de una etapa con cal. El sistema era eficaz para eliminar el calcio en el agua freática, pero solo parcialmente eficaz para eliminar el magnesio y la sílice que también están presentes en el agua freática. El agua acabada se necesita para una amplia variedad de usos. Algunos de estos incluyen reposición de la torre de enfriamiento, lavados de equipos, reposición de alimentación de calderas, humidificación del aire, operaciones de pintura y acabado de metal. Cada uso tiene un requisito de calidad de agua diferente. Un usuario de agua acabada es la alimentación para el equipo de ósmosis inversa. El motivo del sistema de ósmosis inversa es producir agua desionizada (DI) requerida para los enjuagues de pintura y acabado de metal, incluso pintura de deposición electrolítica y fosfatización de zinc.

Debido a una expansión inminente de la planta de ensamble en 1999 y los planes de crear una nueva planta de motores en 2001, GMM realizó un Proyecto de gestión del agua en 1997. Como consecuencia de esto, los siguientes programas se consideraron: 1) nueva perforación de pozos, 2) conservación del agua, 3) mejora de los sistemas de tratamiento del agua, 4) mejora de los sistemas de tratamiento del agua residual, e 5) implementación de nuevos sistemas de reutilización del agua. Para garantizar el suministro de agua adecuado para las expansiones de plantas previstas, la empresa tomó la decisión de implementar los primeros cuatro programas y posponer el último.

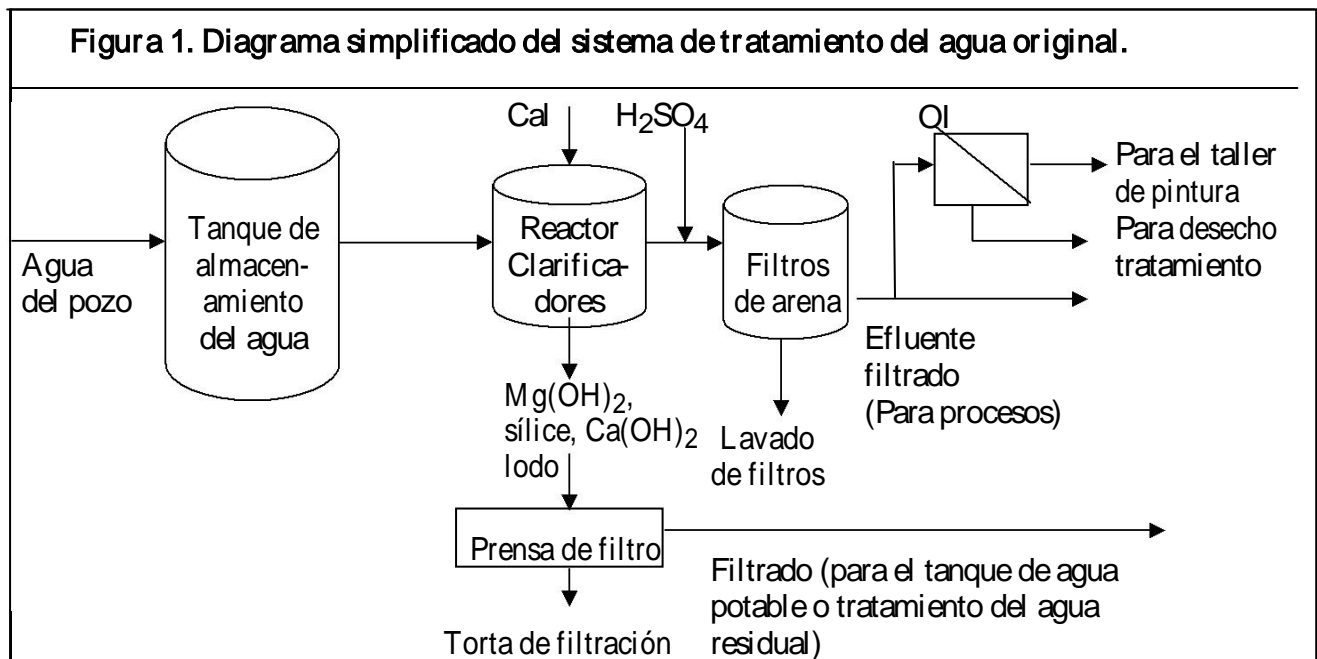
El enfoque del trabajo informado en el presente documento es la mejora del sistema de tratamiento del agua. El motivo principal para requerir la actualización de los sistemas era garantizar un suministro de agua continuo y adecuado para la producción de plantas expandidas. Además, la confiabilidad, conservabilidad y operabilidad a largo plazo de los sistemas de tratamiento del agua se consideraron de primordial importancia. De este modo, el objetivo del proyecto era mejorar la eliminación de la dureza y la sílice mientras se empleaban dichos procesos que conservaban el agua. Un beneficio de conservar el agua era minimizar la generación de agua residual.

## ANTECEDENTES

El agua freática se caracteriza como moderadamente dura y contiene calcio y magnesio. La concentración de calcio del agua freática promedia 67 mg/l como  $\text{CaCO}_3$  y la dureza total del agua freática es de 112 mg/l como  $\text{CaCO}_3$ . La alcalinidad carbonatada total del agua freática promedia 275 mg/l como  $\text{CaCO}_3$ . Los otros analitos inorgánicos en el agua freática son sodio, cloruro y sulfato. La conductividad del agua freática es de aproximadamente 450 microsiemens/cm.

El agua freática también contiene sílice disuelta con una concentración promedio de aproximadamente 40 md/l. La sílice es un problema en las plantas de ensamble de automóviles porque puede causar escamación en las tuberías de suministro de agua, los procesos de fabricación, los sistemas de humidificación y los sistemas de agua de enfriamiento abiertos. Además, la sílice se debe eliminar completamente de las aguas de enjuague antes de que se utilicen en las preparaciones de superficies metálicas o se producirá el pulido de las superficies de automóviles pintadas.

El proceso de tratamiento del agua inicial (ablandamiento de una etapa con cal) está presente en la figura 1. La cal se agrega a la zona del reactor de cada uno de los dos clarificadores de contacto de sólidos. El sistema de ablandamiento funciona con un pH de 10. El efluente del clarificador del contacto de sólidos se filtra, desinfecta y almacena en un tanque de almacenamiento. El lodo generado en los clarificadores de contacto de sólidos se bombeó a un tanque de retención de lodo y luego, se deshidrató mediante una prensa de filtro de placa y marco.



Algunos usuarios grandes de agua acabado son las unidades de ósmosis inversa (OI), las torres de enfriamiento y las cámaras de humidificación del aire. Para mantener la concentración de sílice del agua usada por este equipo dentro del rango especificado, es necesario operar en 1) índices altos de purga (es decir, ciclos bajos de agua en las torres de enfriamiento y cámaras de humidificación del aire) o 2) índices bajos de recuperación de agua para el equipo de OI. Esto tuvo como resultado un aumento en la demanda de agua y en el flujo para la planta de tratamiento de agua residual.

## **METODOLOGÍA**

Con el fin de mejorar la calidad del suministro de agua, GMM consideró un sistema de ablandamiento de dos etapas. El proyecto se realizó en las siguientes dos fases:

- o Diseño conceptual
- o Ingeniería y construcción detallada
- o Puesta en marcha y funcionamiento continuo

En la fase de diseño conceptual, las pruebas de tratabilidad se realizaron para evaluar 1) el tipo y la dosis de los reactivos, 2) los valores de pH óptimos, 3) y los beneficios de agregar una etapa de recarbonización o segunda para el proceso de ablandamiento. La prueba de tratabilidad se llevó a cabo en el sitio de Silao mediante el uso de procedimientos de pruebas de barras de perforación estándares. Los datos de las pruebas de tratabilidad se analizaron para 1) seleccionar el proceso de ablandamiento, 2) preparar un equilibrio del agua para la planta y 3) desarrollar criterios de diseño de equipos. Una tarea importante era especificar el dispositivo de separación de líquidos/sólidos de la segunda etapa. Para esta tarea, la clarificación y filtración convencionales se compararon con la microfiltración (MF) de flujos cruzados.

La segunda fase se realizó como un proyecto de ingeniería y construcción detallada. Esta fase del trabajo se completó en 14 meses. El trabajo realizado incluyó la preparación de dibujos de diseño detallado, adquisición de equipos y construcción de las instalaciones de tratamiento. Una parte muy importante del proceso de ablandamiento era la adquisición de equipos de separación de sólidos/agua de la segunda etapa. Para la técnica de separación de sólidos/agua de la segunda etapa, se especificó un sistema de microfiltración fabricado por Memtek, una unidad de funcionamiento de US Filter. El equipo se instaló y la construcción se completó en agosto de 1999.

La tercera fase del proyecto era la puesta en marcha y el funcionamiento continuo. El sistema de tratamiento del agua actualizado se puso en funcionamiento posterior a la finalización de la construcción. Los datos operativos presentados en este informe representan el período entre enero de 2000 y julio de 2001.

## **RESULTADOS**

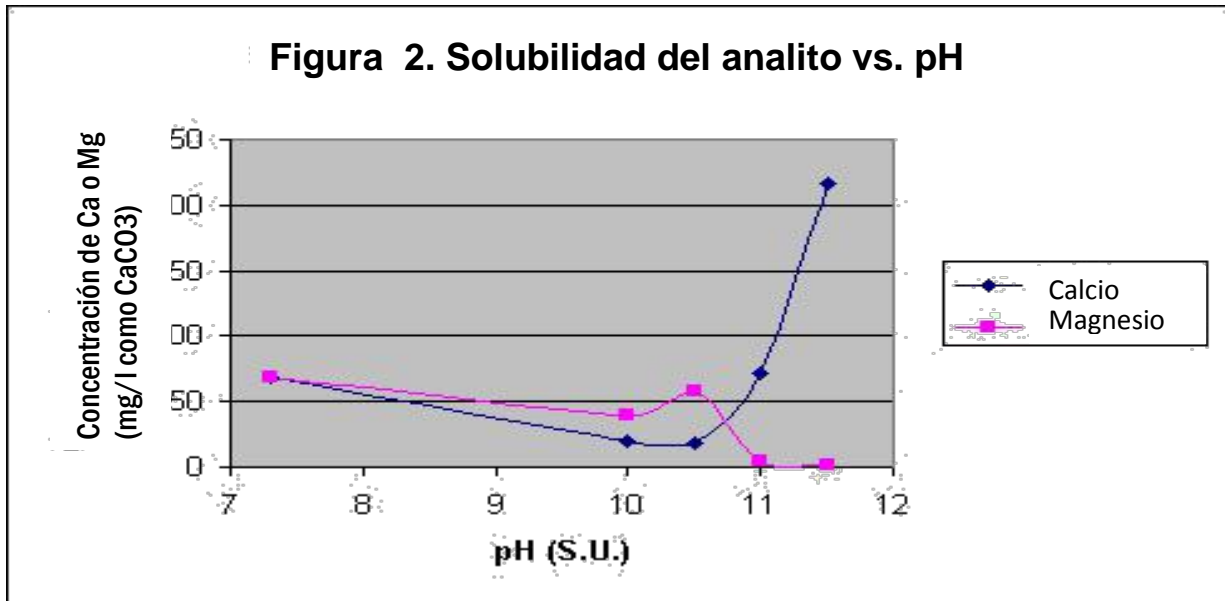
Los resultados representan los datos y las observaciones reunidas durante las tres fases del proyecto.

### **Diseño conceptual**

La primera tarea del proyecto era realizar las pruebas de tratabilidad para 1) determinar el índice de pH óptimo para la precipitación, 2) comparar el ablandamiento de dos etapas y de una etapa para la eliminación de la dureza, y 3) determinar la eficiencia de la eliminación de sílice para dos sales de magnesio.

**Efecto del pH.** El primer conjunto de pruebas de tratabilidad del agua evaluó la precipitación de calcio y magnesio como una función del pH. Los gráficos que representan la concentración de analitos finales como una función del pH se presentan en la figura 2. Los datos muestran que la solubilidad mínima para el magnesio se produce en el índice de pH de 11 a 11,5, mientras que la solubilidad mínima para el calcio se produce en un índice de pH de 10 a 10,5. Debido a que se quiere eliminar tanto el calcio como el magnesio, se seleccionó un sistema de tratamiento de dos

etapas.



**Tratamiento de una etapa vs. tratamiento de dos etapas.** Se evaluó el proceso de ablandamiento de dos etapas. En la primera etapa, el pH aumentó a 11,5 y se permitió que se asentara la suspensión. El sedimento se reunió y el pH se disminuyó a 10 con ácido carbónico. Los resultados del tratamiento de dos etapas se comparan con el proceso de tratamiento de una etapa (tabla 1). El proceso de dos etapas produjo una dureza de agua final de 8 mg/l, mientras que el proceso de una etapa arrojó una dureza del agua de 56 mg/l. Por lo tanto, el proceso de ablandamiento de dos etapas es superior para la eliminación de la dureza.

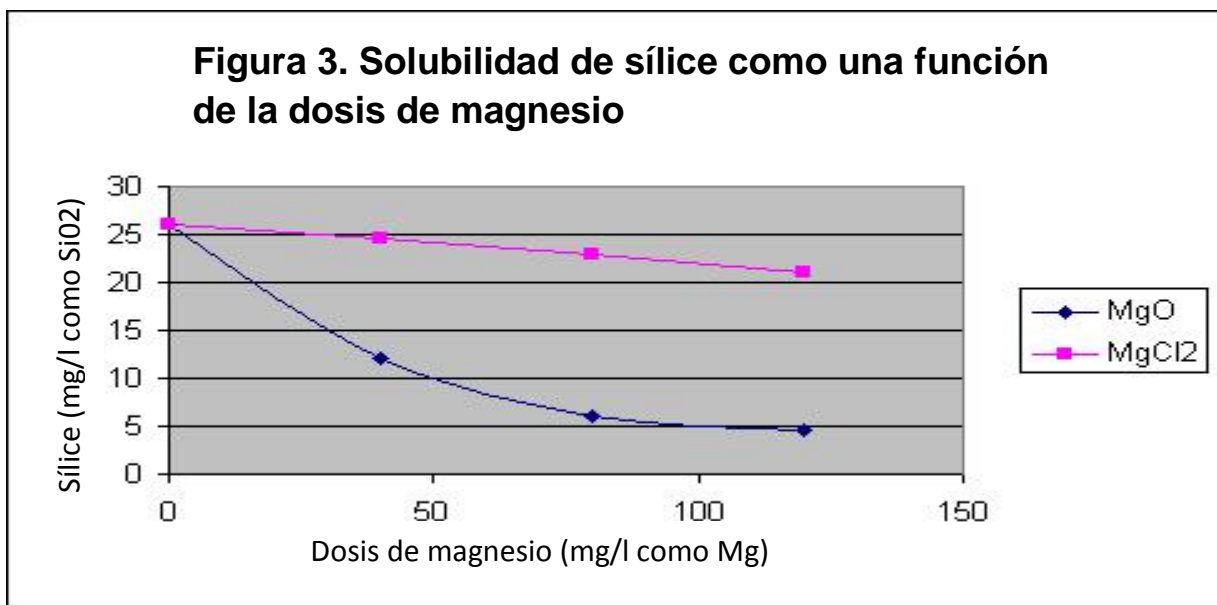
**Tabla 1. Pruebas de tratabilidad de ablandamiento de una y dos etapas**

Ubicación de la muestra	Calcio (mg/l*)	Dureza total (mg/l*)	Magnesio (mg/l*)
Afluente	64	144	80
Efluente de una etapa	20	56	36
Efluente de dos etapas	4	8	4

\*Como CaCO<sub>3</sub>

**Eliminación de la sílice.** Además de eliminar la dureza del suministro de agua, también es necesario eliminar la sílice. Estudios anteriores demostraron que el agregado de sal de magnesio mejora la eliminación de la sílice. Los principales dos mecanismos para la eliminación de la sílice son: 1) precipitación como hidróxido de silicato de magnesio y 2) absorción mediante sólidos de hidróxido de magnesio. Debido a que el magnesio contribuye a la dureza, es necesario operar la reacción a valores de pH alcalino para precipitar el magnesio. Se realizó un conjunto de pruebas para comparar la efectividad del óxido de magnesio con el cloruro de magnesio para la eliminación de sílice. Para estas pruebas, se agregaron sales de magnesio como un polvo y se permitió que reaccionaran con el agua cruda durante una hora. Cuando se completó la reacción, se agregó el hidróxido de calcio para lograr el valor de pH deseado. Según los resultados (figura 3), parecería que el óxido de magnesio es más eficaz

que el cloruro de magnesio. Una explicación posible es que durante el período de reacción de una hora, la solución de óxido de magnesio estaba con un pH superior, que es más propicio para la eliminación de sílice.



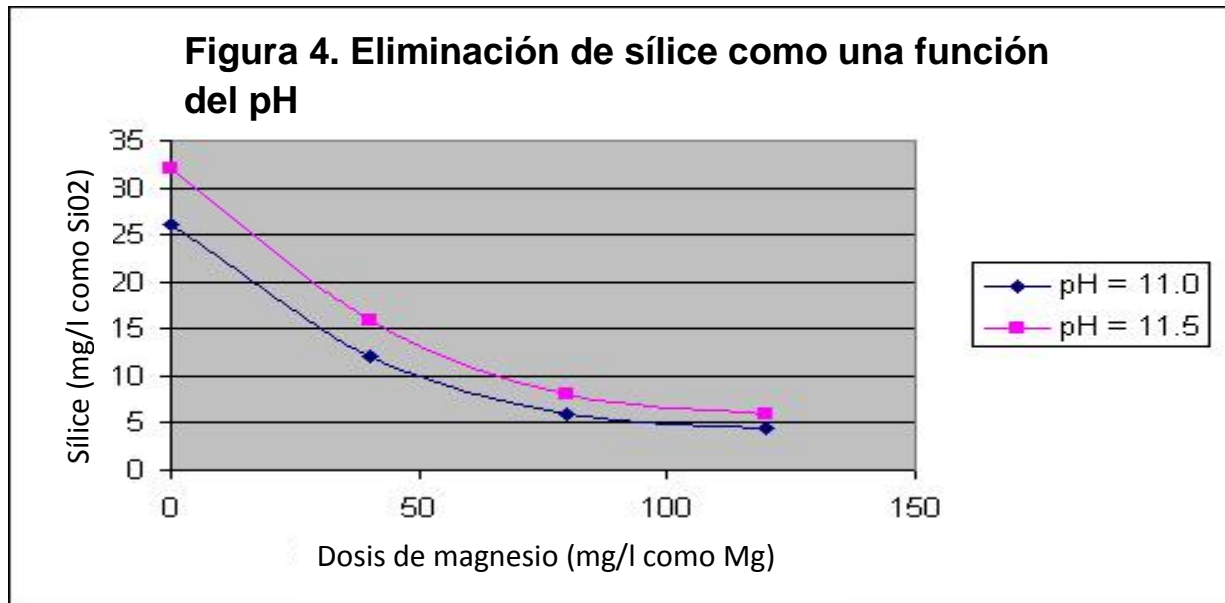
**Pedido de reacción.** Para esta prueba, se evaluaron tres métodos. El primer método era agregar óxido de magnesio, dejar reaccionar durante una hora, agregar cal, dejar reaccionar durante 20 minutos y dejar asentar. El segundo método era agregar cal, dejar reaccionar durante 20 minutos, agregar óxido de magnesio, dejar reaccionar durante 20 minutos y dejar asentar. El tercer método era agregar óxido de magnesio y cal simultáneamente, dejar reaccionar durante 20 minutos y dejar asentar. El óxido de magnesio se agregó como un 5 % de lodo en el magnesio para el índice molar de la sílice de 1:1. El hidróxido de calcio, que se agregó como un 5 % de lodo, se dosificó en las pruebas de barras de perforación para lograr un pH final de 11,5. Los datos (tabla 2) muestran que es beneficioso agregar la cal primero y luego el magnesio. Cuando se agrega la cal primero, el pH se eleva a 11,2 antes de que se agregue el lodo de óxido de magnesio. El pH superior es beneficioso para la eliminación de sílice mediante el magnesio.

**Tabla 2. Efecto de la secuencia de agregado de coagulantes de la eliminación de sílice**

Secuencia de la prueba de barras de perforación	Sílice (mg/l)
1. Agua sin tratar	40,0
2. Agregado de MgO, reacción, agregado de CaO, reacción y asentamiento	20,6
3. Agregado de CaO, reacción, agregado de MgO, reacción y asentamiento	6,4
4. Agregado de MgO y CaO, reacción y asentamiento	9,0

**Dosis de magnesio.** El conjunto final de pruebas investigó la eliminación de la sílice como una función de la dosis de óxido de magnesio y pH. Los datos (figura 4) muestran que un pH final de 11,5 logra una eliminación de la sílice levemente mejor que un pH de 11,0. GMM desea lograr una

concentración de sílice final de menos de 10 mg/l para permitir que se opere el equipo de ósmosis inversa a un índice alto de recuperación del agua y para optimizar los ciclos de concentración en los sistemas de humidificación y los sistemas de agua de enfriamiento abiertos. Esto ayudará a conservar el agua en esta región árida de México. Para lograr un valor de sílice de menos de 10 mg/l, es necesario dosificar el óxido de magnesio a una concentración mínima de aproximadamente 50 mg/l sobre la base de una concentración de sílice inicial de 26 mg/l.



**Desarrollo del proceso.** Los análisis de equilibrio importante realizados durante el diseño conceptual demostraron que un sistema de ablandamiento de dos etapas reduciría el consumo de agua de 10 a 20 % debido a la reducción en el uso del sistema de agua desionizada (es decir, el sistema de ósmosis inversa tendría una recuperación superior de agua) y una reducción de la reposición para el sistema de humidificación del aire (es decir, se lograron mayores ciclos en el sistema de circulación).

**Selección del proceso de microfiltración.** Se realizó un análisis de dispositivos de separación de líquidos/sólidos para el ablandamiento de la segunda etapa. Los equipos de separación convencional (clarificación y filtración) se compararon con la microfiltración. La microfiltración es un proceso de filtración accionado por la presión que utiliza una membrana microporosa para separar los sólidos suspendidos de los líquidos (Anexo I).

El sistema considerado para la planta de Silao es el tipo de flujo cruzado. En este proceso, la solución químicamente pretratada (recarbonatada) de sólidos y líquidos se transfiere a un tanque de proceso (o concentración), en donde se bombea continuamente mediante los módulos de filtración de la membrana a una velocidad de cizallamiento alta (Anexo II). La presión de fluidos provoca que un porcentaje del agua limpia (filtrado) pase por los poros de la membrana, mientras que los contaminantes de las partículas (cristales de sal) de un tamaño superior que el tamaño del poro promedio de la membrana (1 micrón) se rechazan y concentran en el tanque de proceso. La acción de cizallamiento junto con los retrolavados periódicos con aire comprimido evitan que los cristales rechazados se acumulen en la superficie de la membrana.

Con el tiempo, los sólidos se acumularán en la pared de la membrana y limitarán el flujo. Cuando la tasa de flujo disminuye alrededor de 30 a 40 % del valor de la membrana limpia, la unidad de microfiltración se apaga y las membranas se limpian químicamente con el ácido

clorhídrico.

GMM seleccionó el proceso de microfiltración como el dispositivo de separación de líquidos/sólidos para el proceso de tratamiento de la segunda etapa debido a que: 1) produce un efluente de mayor calidad que mejora la recuperación del agua del sistema de ósmosis inversa, 2) requiere menos espacio, y 3) requiere menos agua para el retrolavado que los filtros de medios dobles convencionales. La experiencia de GMM con un sistema de microfiltración en el complejo Ramos Arizpe demostró que el sistema podría operar en un volumen de flujo de agua de aproximadamente  $16,3 \text{ m}^3/\text{d}/\text{m}^2$  ( $400 \text{ gpd}/\text{pies}^2$ ).

**Diagrama de flujo de bloques.** El esquema de flujo (Anexo III) desarrollado durante la fase del diseño conceptual consistió de lo siguiente: el agua freática recuperada se bombea a un tanque de almacenamiento de agua cruda que proporciona almacenamiento para las necesidades de agua para incendios y procesos. Desde el tanque de almacenamiento, el agua freática se bombea a una caja divisoria de fases, desde donde se distribuye en dos clarificadores de contacto de sólidos (SCC). Una de las unidades está dedicada solo al ablandamiento con cal porque el agua es el suministro de agua potable y suministra parte de las necesidades de agua de los procesos de fabricación.

La otra unidad de clarificadores de contacto de sólidos se usa como la primera etapa del proceso de ablandamiento de dos etapas. La lechada de cal se agrega en el tanque de mezcla rápida que es ascendente del SCC. Posterior al agregado de cal, se agrega óxido de magnesio a una dosis constante, controlada por el flujo de agua cruda, para precipitar la sílice. En el SCC, el precipitado se asienta en la parte inferior y se elimina mediante las bombas de lodo, controlado por sincronizador, y el agua clarificada rebalsa de las presas y se descarga al tanque de recarbonización. En el tanque de recarbonización, se agrega dióxido de carbono para disminuir el pH a aproximadamente 10 con el fin de precipitar el calcio como hidróxido de calcio. El lodo se separa del agua mediante la microfiltración. El efluente filtrado se transfiere a un tanque de almacenamiento de agua del proceso en donde se almacena hasta que se pueda alimentar para el sistema de ósmosis inversa y para el taller de pintura para usar como agua de reposición para las cámaras de humidificación del aire.

## Construcción

La fase de construcción consistió en convertir uno de los dos sistemas de tratamiento de una etapa existentes en un sistema de tratamiento de dos etapas. El equipo necesario para la conversión incluyó: 1) equipo de alimentación de óxido de magnesio, 2) tanques de almacenamiento, bombas e inyectores para el agregado de dióxido de carbono, y 3) dos unidades de microfiltración para separar sólidos generados durante el proceso de ablandamiento de la segunda etapa. Otras actividades de construcción incluyeron rehabilitación de los clarificadores de contacto de sólidos para mejorar la extracción de lodo, la instalación de un sistema de cal a granel y la expansión de las prensas de filtros existentes.

El sistema de microfiltración consistió en dos unidades de microfiltración idénticas. Cada unidad era de 11,6 m (38 pies) de largo por 5,2 m (17 pies) de ancho por 3,7 m (12 pies) de alto. Cada unidad tiene un área de filtración de  $70 \text{ m}^2$  ( $754 \text{ pies}^2$ ). El flujo del diseño para cada unidad era de 9,9 l/seg. (226.000 gpd), sobre la base de un flujo de  $12,2 \text{ m}^3/\text{d}/\text{m}^2$  ( $300 \text{ gpd}/\text{pies}^2$ ). La capacidad de cada unidad se puede expandir un 50 % al agregar módulos de filtración.



Cada unidad de microfiltración incluye un tanque de concentración o proceso, bombas de circulación (una en funcionamiento y otra en espera con una velocidad de 1100 gpm), membranas e instrumentación y controles. El tanque de proceso recibe el agua después del agregado de dióxido de carbono y actúa para concentrar los sólidos suspendidos regresados (es decir, concentrado) de los módulos de microfiltración. El contacto de los sólidos de recirculación con el precipitado de calcio nuclea los cristales y acelera la separación de los sólidos. La concentración de sólidos se controla en el tanque de proceso entre 2 y 5 % (por peso), al ajustar la tasa de purga.

Cada unidad de MF se divide más en dos (2) trenes y cada tren consta de 36 módulos. Cada módulo tiene 10 membranas tubulares de una pulgada (2,54 cm) que se arregla de manera similar a un termointercambiador de tubos y forros exteriores. Las membranas de microfiltración tienen un tamaño de poro nominal de 0,1 micrón y se fabrican de un material fluorocarbonado. Por lo tanto, el sistema de microfiltración es adecuado para una amplia variedad de condiciones que se recomendarían durante el funcionamiento o la limpieza normal. El sistema de microfiltración puede tolerar la limpieza agresiva mediante el uso de hipoclorito de sodio (hasta un 15 % de la fuerza) o ácido clorhídrico (gasta 10 % de la fuerza). Para limpiar químicamente las unidades, deben estar fuera de la línea.

Cada unidad de microfiltración tiene un requisito eléctrico de 250 amperes a 380 VCA/50 Hz. Las unidades se limpian en el lugar mediante el retrolavado con aire de la planta cada 18 a 30 minutos (el intervalo es ajustable).

El filtrado del sistema de microfiltración se usa como el agua de alimentación para el sistema de ósmosis inversa y la reposición para los sistemas de humidificación del taller de pintura. El permeado de OI se usa principalmente para el proceso de deposición de pintura electroforética. Debido a que la alimentación de OI contiene bajas concentraciones de sílice, calcio y magnesio, la recuperación para el sistema de OI ha sido superior al 80 % y se puede aumentar más con el agregado de una tercera etapa.

## Funcionamiento

GMM operó el proceso de ablandamiento de dos etapas durante dos años. Los datos más recientes para el sistema de tratamiento se presentan en la Tabla 3. Los datos promedio de calcio, magnesio y sílice para los últimos 12 meses están presentes en la Tabla 3. Los datos muestran que el sistema es muy eficaz para la eliminación de los componentes de inquietud.

**Tabla 3. Resumen de los datos operativos**

<b>Parámetro</b>	<b>Agua cruda</b> (mg/l como CaCO <sub>3</sub> )	<b>Efluente de la primera etapa</b> (mg/l como CaCO <sub>3</sub> )	<b>Efluente de la segunda etapa</b> (mg/l como CaCO <sub>3</sub> )	<b>Eliminación general</b> (%)
Calcio	67	19	11	84
Magnesio	85	17	13	85
Sílice*	40	11	9	78

\*Informado como mg/l como SiO<sub>2</sub>

Los productos químicos que se usan en el proceso de ablandamiento del agua de dos etapas son cal (es decir, óxido de calcio), óxido de magnesio y dióxido de carbono. La dosis promedio para los últimos 12 meses se presenta en la Tabla 4.

**Tabla 4. Uso de productos químicos para el ablandamiento**

Proceso	Óxido de calcio (kg/m <sup>3</sup> como CaCO <sub>3</sub> )	Óxido de magnesio (kg/m <sup>3</sup> como CaCO <sub>3</sub> )	Dióxido de carbono (kg/m <sup>3</sup> como CaCO <sub>3</sub> )
Ablandamiento de la primera etapa	1,01	0,730	0
Ablandamiento de la segunda etapa	0	0	0,280

El lodo generado por el proceso de ablandamiento de la primera etapa y la purga de los tanques de proceso de microfiltro se bombean hacia un tanque de retención antes de deshidratar. Desde el tanque, el lodo se envía a cualquiera de las dos presas de filtro de placa y marco. El lodo deshidratado, que tiene un contenido de sólidos de aproximadamente un 70 %, se transporta a un vertedero para su desecho.

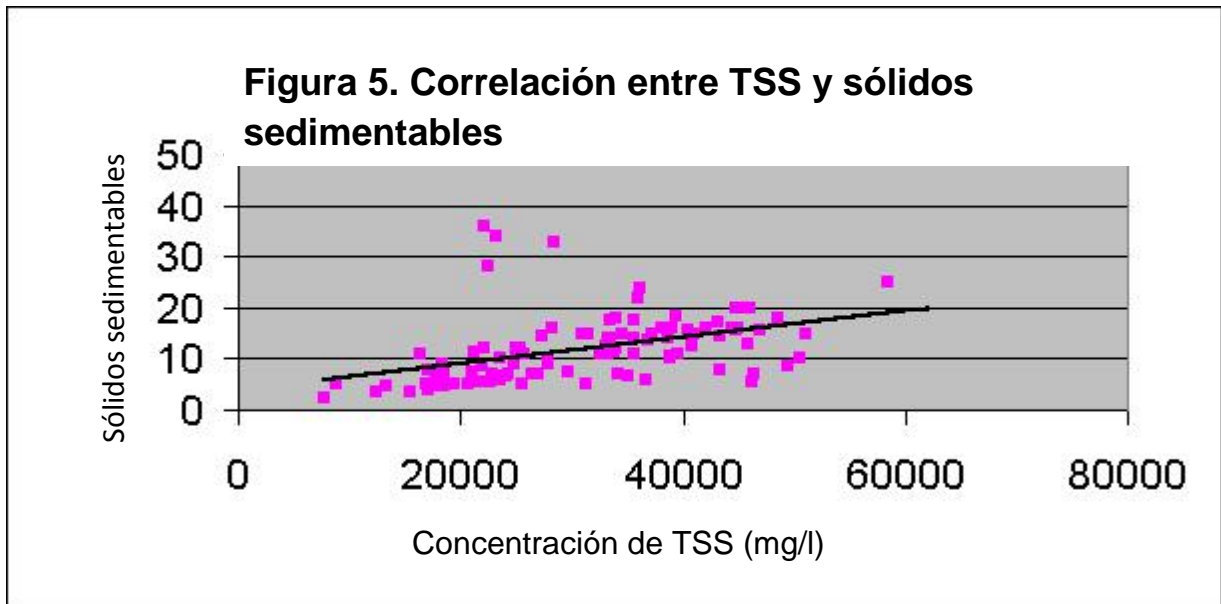
## DISCUSIÓN

La experiencia operativa de escala completa de un proceso de ablandamiento de dos etapas que usa microfiltración para el dispositivo de separación de la segunda etapa era consistente con las expectativas sobre la base de las pruebas de tratabilidad y las discusiones con los representantes de Memtek. Una tabla que ilustra el rendimiento a nivel de mesa de trabajo y la experiencia de los últimos 12 meses se presentan en la Tabla 5.

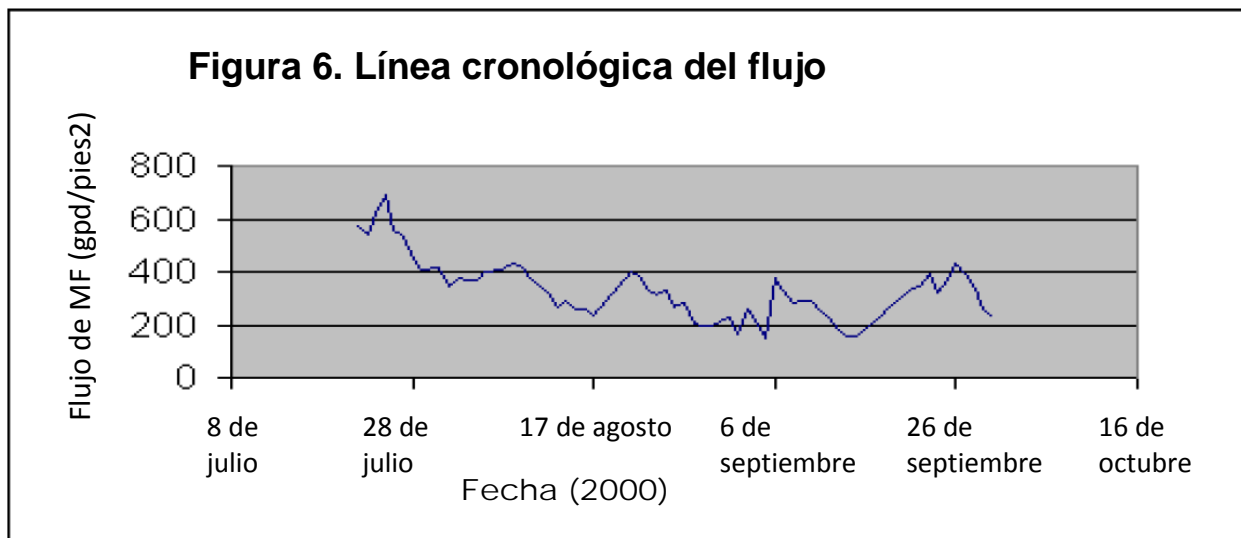
**Tabla 5. Comparación de los resultados de las pruebas de tratabilidad y el rendimiento real**

Parámetro	Pruebas de tratabilidad	Experiencia a escala completa
Calcio (mg/l como CaCO <sub>3</sub> )	4	11
Magnesio (mg/l como CaCO <sub>3</sub> )	8	13
Sílice (mg/l como SiO <sub>2</sub> )	8	9

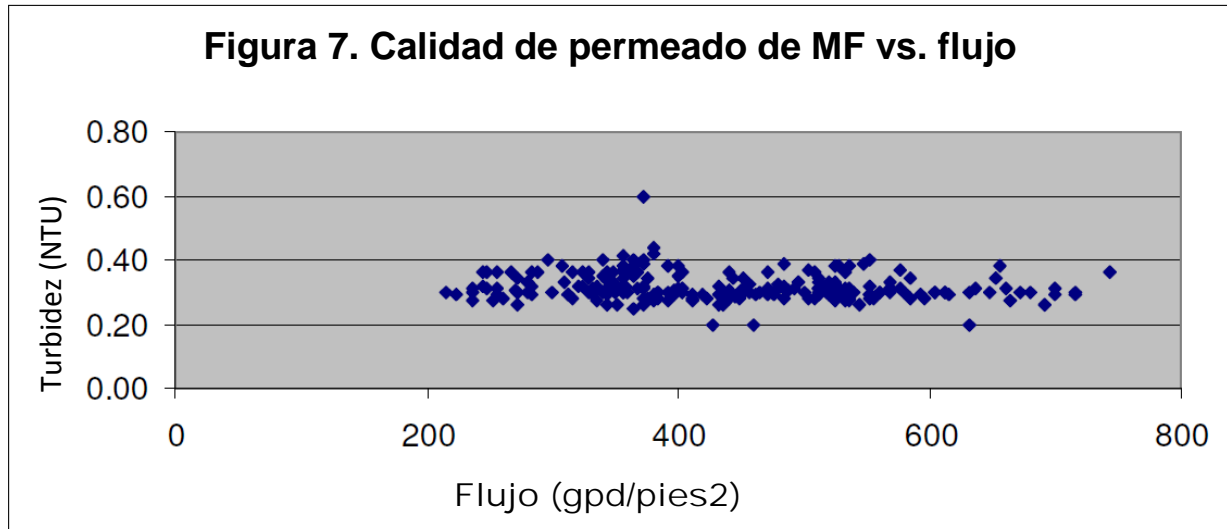
Durante el arranque, el sistema de microfiltración experimenta períodos de tasas bajas de flujos y turbidez alta del efluente. Una investigación del problema determinó que la solución en el tanque de almacenamiento estaba muy diluida. Se concluyó que una concentración mínima de TSS del 2 % se debería mantener en el tanque. Debido a que demanda mucho tiempo analizar frecuentemente las concentraciones de TSS del tanque de alimentación, GMM reunió datos para permitir una correlación entre sólidos sedimentables y TSS que se establezcan. La correlación (Figura 5) permite a los operadores mantener un mínimo de concentración de TSS al realizar la prueba de sólidos sedimentables.



Una foto instantánea de dos meses de los valores de flujos de microfiltración se presenta en el gráfico de la Figura 6. En el gráfico se muestra un flujo inicial de aproximadamente  $24,4 \text{ m}^3/\text{d}/\text{m}^2$  ( $600 \text{ gpd}/\text{pies}^2$ ). La tasa de flujo disminuyó en las siguientes cuatro semanas aproximadamente  $10,2 \text{ m}^3/\text{d}/\text{m}^2$  ( $250 \text{ gpd}/\text{pies}^2$ ). La unidad de microfiltración se tomó fuera de la línea el 17 de agosto y se limpió. Después de la limpieza, la unidad de microfiltración se volvió a poner en servicio y el flujo regresó a aproximadamente  $16,3 \text{ m}^3/\text{d}/\text{m}^2$  ( $400 \text{ gpd}/\text{pies}^2$ ). El flujo disminuyó aproximadamente  $8,2 \text{ m}^3/\text{d}/\text{m}^2$  ( $200 \text{ gpd}/\text{pies}^2$ ) después de tres semanas de funcionamiento. El sistema se limpió el 6 de septiembre, pero el flujo solo aumentó aproximadamente  $14,3 \text{ m}^3/\text{d}/\text{m}^2$  ( $350 \text{ gpd}/\text{pies}^2$ ). El flujo bajo medido después de la limpieza del 6 de septiembre podría indicar una limpieza incompleta. Esto se respalda aún más mediante el hecho de que la unidad de microfiltración se tenía que limpiar nuevamente el 15 de septiembre. La experiencia de la planta en los dos años de funcionamiento es que la frecuencia de la limpieza es de dos a cuatro semanas. Las membranas se limpian inicialmente con hipoclorito de sodio para eliminar bacterias. Luego, las membranas se limpian con ácido de hipoclorito para eliminar la rebaba.



Independientemente del flujo, las unidades de microfiltración produjeron una excelente calidad de efluentes. Una línea de los datos de turbidez y flujo de julio de 2000 se presentan en la Figura 5. En la figura, se muestra que un efluente de alta calidad se produce en las tasas de flujo entre 10 y 30 m<sup>3</sup>/d/m<sup>2</sup> (de 250 a 750 gpd/pies<sup>2</sup>).



## CONCLUSIONES

El sistema de ablandamiento de dos etapas mediante el uso de la tecnología como el dispositivo de separación de sólidos/líquidos de la segunda etapa ha estado en funcionamiento durante aproximadamente dos años. El proceso produjo un suministro de agua de alta calidad que tuvo como resultado valores de dureza de menos de 30 mg/l y concentraciones de sílice de menos de 10 mg/l. La turbidez del agua acabada promedia aproximadamente 0,3 NTU. La excelente calidad del agua del sistema de dos etapas minimizó la purga del sistema de humidificación y permitió la ósmosis inversa para funcionar a recuperaciones de agua del 82 % en oposición al 67 % antes de que se instara el proceso de ablandamiento de dos etapas. El uso de agua menor para el equipo del proceso permitió que la planta de ensamble de Silao/GMM redujera la extracción de agua de pozo. GMM observó una disminución en la tasa del uso del agua de aproximadamente un 20 %.

Actualmente, la planta de Silao está considerando la reutilización del efluente de agua residual tratado. Una revisión del saldo del agua general sugiere que sería rentable tratar el agua de todos los pozos con el proceso de ablandamiento de dos etapas. En la actualidad, se están tomando medidas para realizar esta conversión.