

# MONTAJE DE UN REACTOR DISCONTINUO A NIVEL SEMIPILOTO PARA LA OXIDACIÓN CATALITICA DE ASFALTOS COLOMBIANOS

N. AFANASIEVA, M. ÁLVAREZ, M. T. CARREÑO, R. MARTÍNEZ

Escuela de Ingeniería Química  
U.I.S., Bucaramanga Colombia  
A.A. 678  
email: malvarez@uis.edu.co.

## RESUMEN

En este trabajo se presenta la experiencia del montaje de una planta de oxidación de asfaltos colombianos con oxígeno del aire a nivel semipiloto sin catalizadores y en presencia de un catalizador. Se ha realizado la oxidación catalítica de los fondos de vacío del Complejo Industrial de Barrancabermeja (CIB) con introducción del cloruro férrico en calidad de catalizador.

## INTRODUCCIÓN

Los asfaltos o bitúmenes son materiales cementantes que provienen de yacimientos naturales o como residuo de la refinación de la mayoría de crudos del petróleo. Físicamente pueden ser de consistencia líquida, semisólida o sólida con un amplio rango de temperaturas de ablandamiento desde 313 K hasta 353 K (1).

Los asfaltos oxidados o soplados se clasifican como asfaltos mejorados para la construcción, gracias a las buenas características de adherencia con agregados o metales, penetración, punto de ablandamiento y una más alta resistencia a la termooxidación y humedad (2).

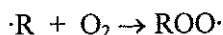
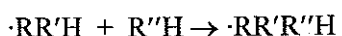
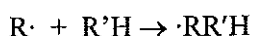
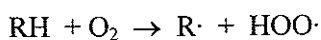
La oxidación de los asfaltos se conoce como un proceso en el cual un material asfáltico mediante calentamiento con temperaturas mayores de 473 K se convierte en un producto de propiedades modificadas por el contacto continuo con aire (3).

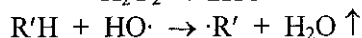
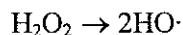
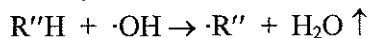
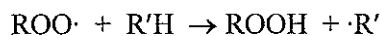
El asfalto oxidado basa sus usos en que es un material menos susceptible a los cambios de temperatura y además presenta un buen comportamiento a temperaturas bajas (4,5).

Se conoce el proceso de oxidación de asfaltos con oxígeno en las plantas industriales de Estados Unidos, Rusia y otros (6). En Colombia solamente existe una planta de oxidación de asfaltos con aire, la cual pertenece a la empresa Manufacturas y Procesos Industriales MPI. Aún no se conocen datos sobre oxidación catalítica de asfaltos colombianos. En países vecinos como Venezuela hay mayor producción de asfaltos oxidados tipo III y IV (7).

En el proceso de oxidación con oxígeno del aire simultáneamente ocurren diferentes tipos de reacciones porque los grupos que representan al asfalto contienen compuestos de diversas estructuras y pesos moleculares (entre 200 y 200000) (8).

Las principales reacciones del mecanismo de oxidación son las de deshidrogenación, en las que tiene lugar la formación de vapor de agua como producto de dichas reacciones; las reacciones de condensación, las cuales contribuyen al incremento del peso molecular y dureza de asfalto, y las reacciones de polimerización (9).

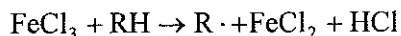




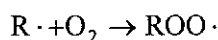
Donde, R-H es un hidrocarburo y la primera etapa es la formación de radicales libres.

En el caso del uso de un catalizador como el  $\text{FeCl}_3$  para acelerar el proceso de oxidación, éste influiría significativamente en el mecanismo de oxidación, y las reacciones serían, como las propone el autor Gun R. B.(10):

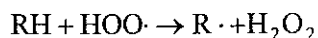
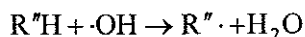
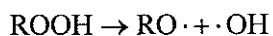
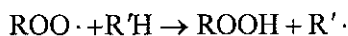
**a) Primera Etapa.** Nacimiento de la cadena y formación de los radicales libres por acción de la temperatura como resultado del cambio de valencia del hierro.

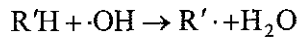
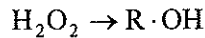


**b ) Segunda Etapa.** Reacción del radical libre con oxígeno molecular, aumentando de esta manera la posibilidad del encuentro de radicales de los hidrocarburos con el oxígeno como consecuencia del aumento de la concentración de estos radicales en el periodo inicial de oxidación.

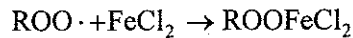
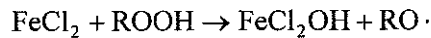


Reacción del radical peróxido con un nuevo hidrocarburo.

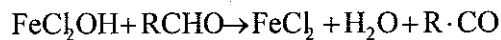




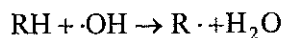
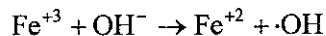
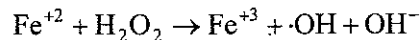
**c) Tercera etapa.** Al mismo tiempo que ocurre la destrucción común de los peróxidos y sus radicales con la aparición de los aldehidos, cetonas y alcoholes, hay posibilidad de una reacción de los radicales hidroperóxidos con el  $\text{Fe}^{+2}$ .



**d) Cuarta etapa.** Reacciona el  $\text{Fe}^{+3}$  con los productos de oxidación, los cuales tienen propiedades de reducción y como resultado de la reacción se presenta la posibilidad de regeneración del  $\text{Fe}^{+2}$  con formación de agua.



**e) Quinta etapa.** Formación de nuevos radicales con desprendimiento de agua. Las reacciones del  $\text{Fe}^{+2}$  y del  $\text{Fe}^{+3}$  como agentes activos, los cuales forman los complejos con radicales oxigenados o hidroxilos. Los productos de oxidación presentan complejos de alto peso molecular.



**f) Sexta etapa.** Aumenta la velocidad de destrucción de los peróxidos pero continúan las reacciones con iones de  $\text{Fe}^{+2}$ .

**g) Séptima etapa.** Formación de complejos de los iones del Fe con los compuestos de la materia prima que contienen S, N, etc.

Lockwood en 1959 (11) estableció que la velocidad de reacción hasta una temperatura de oxidación de 260°C y un flujo de aire bajo, pertenece a una reacción de primer orden, pero esta ecuación se presenta para un caso específico ya que al mismo tiempo ocurren diversas reacciones químicas de difusión.

La temperatura de ablandamiento cambia constantemente, por tanto es necesario la corrección de las constantes de velocidad de reacción para el uso práctico de la reacción.

La ecuación integrada de Lockwood consiste en lo siguiente:

$$K_o = \frac{1}{\tau} \ln \frac{t_{p,\tau}}{t_{p,0}} \quad (1)$$

Donde,

$K_o$  : Constante de velocidad de reacción global, la cual depende del proceso de difusión de la fase gaseosa y a la fase líquida y la del gas, y también del orden de la reacción química

$t_{p,\tau}$  : Temperatura de ablandamiento del asfalto a partir del tiempo  $\tau$  [°K]

$t_{p,0}$  : Temperatura de ablandamiento del asfalto inicial para un  $\tau = 0$  [°K]

$\tau$  : Tiempo de oxidación [horas]

Gun por su parte propuso otras ecuaciones para deducir la cinética del proceso:

$$R_j = K_j C_i CO_2 \quad (2)$$

Donde,

$R_j$  : Velocidad de reacción y se determina por la cantidad  $i$  del compuesto inicial, el cual reacciona en un tiempo determinado en la unidad de volumen,  $j = 1, 2, \dots, 11$

$K_j$  : Constante de velocidad de reacción

$C_i$  : Concentración  $i$  del componente inicial en la reacción  $j$

$C_{O_2}$  : Concentración del oxígeno que reaccionó con el asfalto

La concentración de un componente inicial para un reactor discontinuo se determina por:

$$C_i = \frac{m_i}{M_i V} \quad (3)$$

Donde,

$m_i$  : Masa de asfalto en el reactor

$M_i$  : Peso molecular del asfalto

$V$  : Volumen del reactor

$$C_{O_2} = \frac{\beta P_{O_2}}{\sum_{j=1}^{11} K_j C_i} \quad (4)$$

$$r_i = \frac{1}{V} \frac{dC_i}{d\tau} \quad (5)$$

Donde,

$\beta$  : Coeficiente de transferencia de masa  
del oxígeno desde la fase líquida

$P_{O_2}$  : Presión parcial del oxígeno

$r_i$  : Suma de todas las velocidades de  
reacción

Debido a la complejidad de la naturaleza del asfalto existe un gran número de variables que influyen en el proceso, las cuales se pueden ajustar y controlar para obtener un producto de las especificaciones requeridas de calidad. La primera variable que afecta la calidad del producto final es la naturaleza química del crudo del cual proviene el fondo de vacío o materia prima para la oxidación (12). Además existen otras variables que son específicas del producto como son:

Velocidad de flujo de aire (o burbujeo): Su incremento ocasiona el aumento de la velocidad de oxidación y por consiguiente la velocidad de endurecimiento del asfalto. Las velocidades de flujo a escala piloto de acuerdo con los autores (13) están en el rango de 0.0011 y 0.03 m<sup>3</sup>/s.

Temperatura de oxidación: Las temperaturas entre 423 y 623 K se han reportado (14) como las apropiadas para oxidar cualquier tipo de asfalto a nivel piloto e industrial. Un incremento en la temperatura del proceso acelera velocidad de reacción y consecuentemente reduce el tiempo de soplado. Con temperatura de 630 K se presenta la coquización del asfalto.

Velocidad de agitación: El aumento de la intensidad de agitación ha demostrado ser favorable para aumentar el porcentaje de oxígeno que reacciona con el asfalto hasta niveles aproximadamente de 100 rpm (15).

Nivel de llenado del asfalto en el reactor: La velocidad de oxidación se incrementa con la disminución de la altura del asfalto líquido en el recipiente de reacción tipo columna vertical. Al aumentar la altura se prolonga el periodo de contacto del oxígeno con el asfalto. Una altura equivalente al 30% de la altura total del reactor es lo más conveniente para un periodo de oxidación de 180 minutos (16).

Grado de dispersión del gas: De esta variable depende la buena eficiencia de absorción del oxígeno en el asfalto, tamaño y forma de las burbujas. La homogeneidad depende del diseño del dispersador (16).

Uso de catalizadores de oxidación: El objeto general de emplear agentes catalíticos es reducir el tiempo de oxidación y mejorar la concentración de estos catalizadores tanto a escala piloto como a escala industrial varía entre 0.1 y 3% en masa, dependiendo del compuesto usado (17).

Existen dos procesos para la manufactura de asfaltos oxidados, el discontinuo y el continuo (18). El primero de ellos se caracteriza porque permite el procesamiento de pequeñas cantidades de materia prima de cualquier naturaleza y también el uso de catalizadores para el aceleramiento del proceso.

El proceso continuo presenta algunas ventajas con respecto al proceso batch (discontinuo o por cochada) entre las que Figuran: tiempo de oxidación más corto (30 al 40% del tiempo por cochada), mayor rendimiento por unidad de inversión y pérdidas menores por soplado. También presenta una gran desventaja y es que requiere que la materia prima conserve siempre las mismas propiedades y la misma composición ya que la unidad oxidadora es previamente diseñada para manejar asfalto de ciertas características (19).



El montaje de la planta oxidadora tiene como proyección para los asfaltos compuestos los dos siguientes aspectos:

1. Una aplicación más amplia del asfalto oxidado en la construcción de carreteras y como impermeabilizante. En varios países de Europa y en Estados Unidos el uso de los asfaltos oxidados en pavimentación es alrededor del 40% del total producido. De acuerdo con los datos reportados por ECOPETROL, Colombia oxida alrededor del 6% del total de asfalto producido.

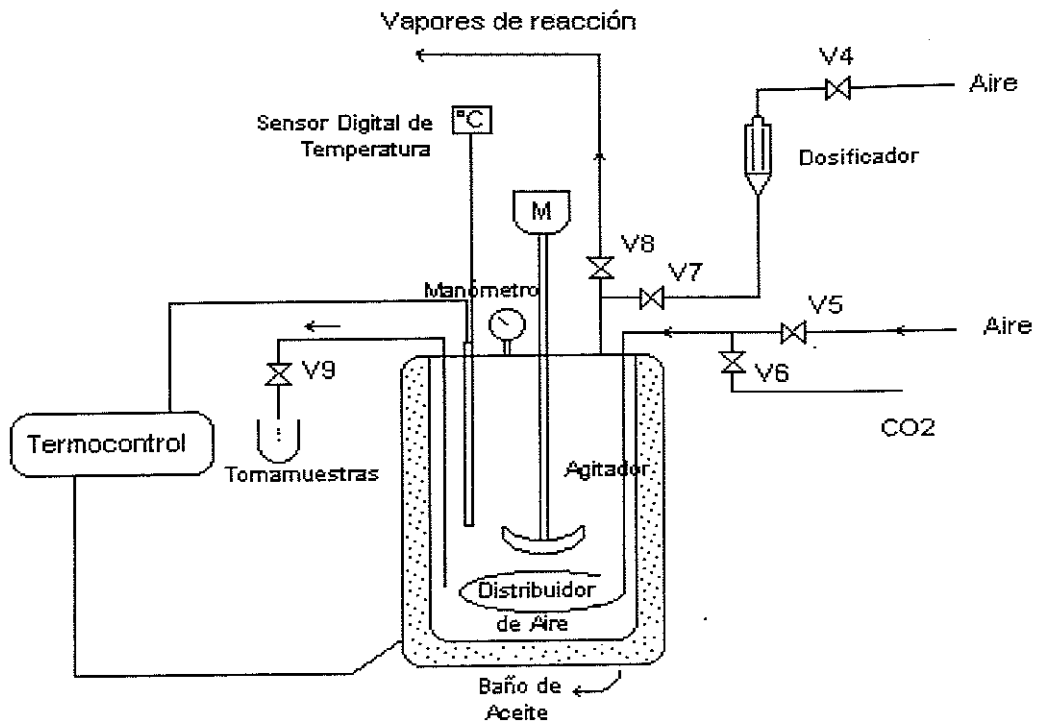
Dichos pavimentos han presentado tiempos de vida útil mayores comparado con los asfaltos corrientes. Su aplicación en la construcción de carreteras representaría una solución frente al deterioro prematuro que sufren actualmente los pavimentos en Colombia.

2. La utilización de catalizadores para la oxidación del asfalto, lo cual reduciría el tiempo de soplado hasta en un 40% y por consiguiente disminuiría el consumo energético y suministro de aire.

## **PARTE EXPERIMENTAL**

### **Montaje del Equipo de Oxidación a Nivel Semipiloto**

El objetivo general del trabajo fue realizar el diseño y montaje de un reactor a nivel semipiloto para la oxidación de asfalto por cocheda con oxígeno del aire y con propiedades básicas del asfalto. La introducción de catalizador. Para tal fin se utilizó un autoclave con reactor tipo batch de fabricación alemana, modelo LA 1000 (véase la Figura 1). Las especificaciones del autoclave están dadas en la tabla 1.



**Figura1.** Autoclave con reactor discontinuo para la oxidación del asfalto

**Tabla 1.** Datos Técnicos del Autoclave

Capacidad	0.01 m <sup>3</sup>
Diámetro del reactor	0.18 m
Altura del reactor	0.38 m
Temperatura máxima de servicio	558 K.
Potencia	3000 W

El equipo completo se presenta en la Figura 2 y consta de (20):

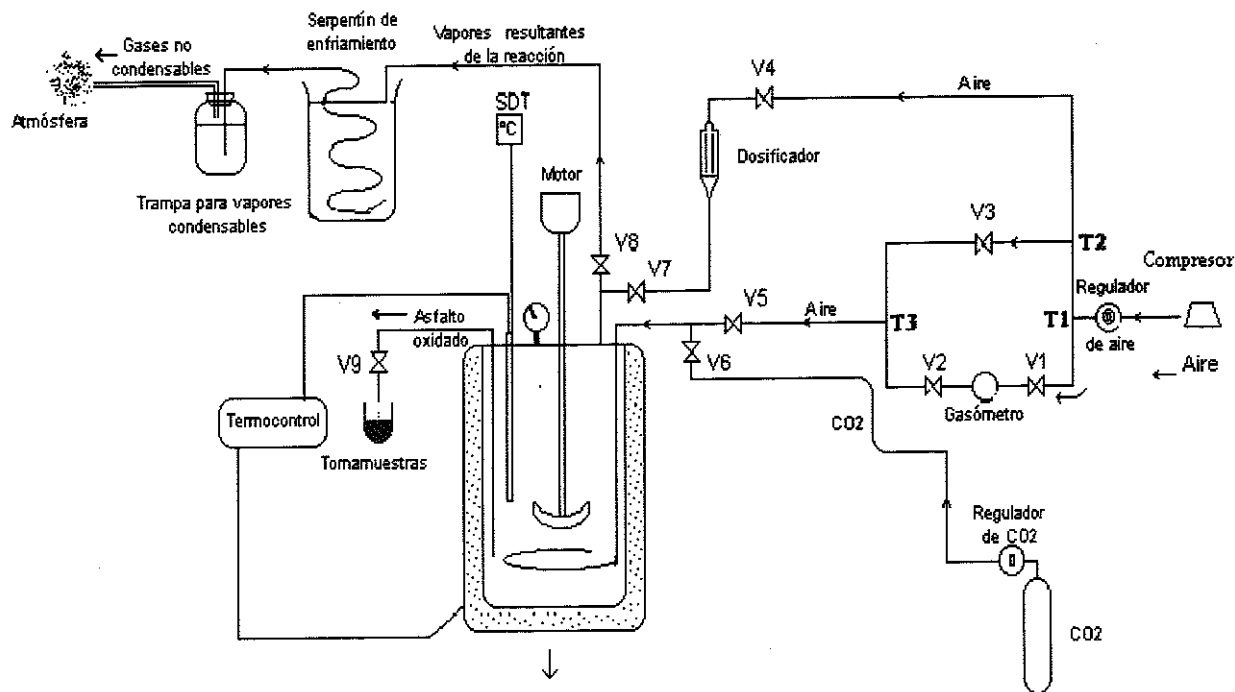
\* Cilindro para la oxidación del asfalto. Es el recipiente en el cual se carga la materia prima, tiene por dimensiones 0.175 metros de diámetro y 0.35 metros de altura.

\* Sistema de salida del asfalto oxidado. Permite la toma de muestras de asfalto oxidado para su posterior estudio. Consta de una tubería de acero inoxidable de 0.0127 centímetros de diámetro interno fijada en la parte superior del autoclave. En el centro de la tubería está localizada una válvula (V9) de globo en acero inoxidable que es la encargada de permitir el paso del asfalto oxidado hacia el exterior. Con el objeto de evitar el enfriamiento del asfalto y a su vez el taponamiento de la tubería se colocó alrededor de esta última una resistencia eléctrica de 800 W.

Conducto de gases de reacción. Los gases que se producen durante la reacción se conducen mediante un tramo de tubería de acero inoxidable de 0.006 metros de diámetro interno hacia una válvula de globo (V8), la cual deja pasar los gases provenientes del reactor para su posterior condensación.

Sistema de condensación de los gases de reacción. Consiste en un recipiente metálico que contiene un serpentín de acero inoxidable de 0.006 metros de diámetro interno, por el cual circulan los gases de reacción para ser luego condensados.

Trampa para los vapores condensables. Una vez que los vapores pasan por el serpentín se llevan hacia una trampa, la cual consiste en un recipiente de vidrio de aproximadamente 0.005 m<sup>3</sup> de capacidad que contiene una solución de NaOH al 10% en peso, que es la que se encarga de retenerlos.



*Reactor tipo Batch con sistema de calentamiento y agitación*

**Figura 2.** Montaje de la Planta Semipiloto para la Oxidación de Asfaltos Colombianos

Distribuidor de aire. Es el encargado de entregar el aire a la masa de asfalto dentro del reactor. Está hecho en acero inoxidable y consiste en una tubería en forma de aro de 0.006 metros de diámetro interno que posee 12 orificios de 0.005 metros de diámetro, para la salida del aire.

Sistema de regulación del flujo del aire. Este sistema contiene tres válvulas de globo (V2, V3, V4) y tres de aguja (V1, V5, V6), un gasómetro y un dosificador.

El aire necesario para la oxidación del asfalto es suministrado por un compresor y llega al sistema a través de las válvulas para su regulación antes de ser alimentado al reactor.

La válvula V6 cumple la función de suministrar  $\text{CO}_2$  al autoclave en caso de emergencia. El  $\text{CO}_2$  proviene de una bala que soporta presiones entre  $5 \text{ E}^6$  y  $1.6 \text{ E}^9$  Pa. El gasómetro trabaja con una presión máxima de 4800 Pa y es de manejo manual para medir el flujo de aire que entra al reactor.

### **Metodología**

Para la oxidación fue elegido el fondo de vacío típico del Complejo Industrial de Barrancabermeja CIB. La caracterización físicoquímica inicial de dicho asfalto se muestra en la tabla 2.

**Tabla 2.** Caracterización Físicoquímica del Asfalto CIB Inicial

---

Penetración a 25 °C	87 mm/10
Densidad a 25 °C	994 Kg/m <sup>3</sup>
Punto de Ablandamiento	319 K
Punto de Chispa	564 K
IP	-0.9

---

Para la medición de las propiedades del asfalto CIB de penetración, punto de ablandamiento y punto de chispa se utilizaron las normas ASTM D-5, D-36, D-42 respectivamente y para la medición de la densidad se empleó el método ruso del equilibrio o de la gota (19).

El índice de penetración (IP) fue calculado a partir de los datos de punto de ablandamiento y penetración.

La metodología consistió básicamente en dos modalidades de oxidación:

1. Oxidación del asfalto CIB con oxígeno del aire.
2. Oxidación del asfalto CIB con oxígeno del aire y catalizador  $\text{FeCl}_3$ .

En las dos modalidades se trabajó con carga, temperatura de oxidación, concentración del catalizador, tiempo de oxidación, velocidad de flujo de aire y velocidad de agitación constantes.

Las condiciones de operación para la oxidación del asfalto se presentan en la tabla 3.

**Tabla 3.** Condiciones de Operación para la Oxidación del Asfalto CIB

---

Carga	3 Kg
Temperatura de oxidación	503 K
Concentración del catalizador	0.3 %
Tiempo de oxidación	10 800 s
Velocidad flujo de aire	0.0022 m <sup>3</sup> /Kg s
Velocidad de agitación	53 rpm

---

## RESULTADOS Y CONCLUSIONES

El montaje hecho a nivel semipiloto para oxidación de asfalto permitió realizar las oxidaciones del fondo de vacío CIB con soplado de aire solamente y también cuando la oxidación se hizo con introducción del catalizador  $\text{FeCl}_3$ . Los resultados obtenidos se resumen en las tablas 4 y 5, las cuales presentan

la caracterización físicoquímica del asfalto CIB para las dos modalidades de oxidación.

**Tabla 4.** Caracterización Físicoquímica del Asfalto CIB Oxidado con O<sub>2</sub> del Aire

---

Penetración a 25 °C	30 mm/10
Densidad a 25 °C	1010.9 Kg/m <sup>3</sup>
Punto de Ablandamiento	329 K
Punto de Chispa	>564 K
IP	-0.83

---

**Tabla 5.** Caracterización Físicoquímica del Asfalto CIB oxidado con O<sub>2</sub> del Aire en Presencia del Catalizador FeCl<sub>3</sub>

---

Penetración a 25 °C	11 mm/10
Densidad a 25 °C	1017.8 Kg/m <sup>3</sup>
Punto de Ablandamiento	353 K
Punto de Chispa	>564 K
IP	1.44

---

La penetración es una característica de la dureza del asfalto y es afectada cuando el asfalto es sometido a un proceso de oxidación y aún más si la oxidación se lleva a cabo en presencia del catalizador FeCl<sub>3</sub>.

Las variaciones en el valor de la penetración se manifiestan por el cambio de la consistencia durante el proceso de oxidación como consecuencia del endurecimiento del asfalto. En la Figura 3 se observa la disminución rápida del

valor de penetración del asfalto oxidado con respecto al valor inicial y luego su descenso lento hasta el final de la oxidación. También se observa que utilizando catalizador se puede obtener valores más bajos de penetración para un mismo tiempo de oxidación.

A partir de los resultados obtenidos en la oxidación del asfalto de Barrancabermeja con oxígeno del aire sin catalizador y con oxígeno del aire en presencia de catalizador fue calculada la constante de velocidad de reacción global utilizando la ecuación de Lockwood (1), para la cual se tuvo en cuenta la temperatura de ablandamiento final  $t_{p,\tau} = 329$  K para la modalidad sin catalizador y 353 K para la modalidad con catalizador, la temperatura de ablandamiento inicial  $t_{p,0} = 319$  K y el tiempo de oxidación  $\tau = 3$  horas.

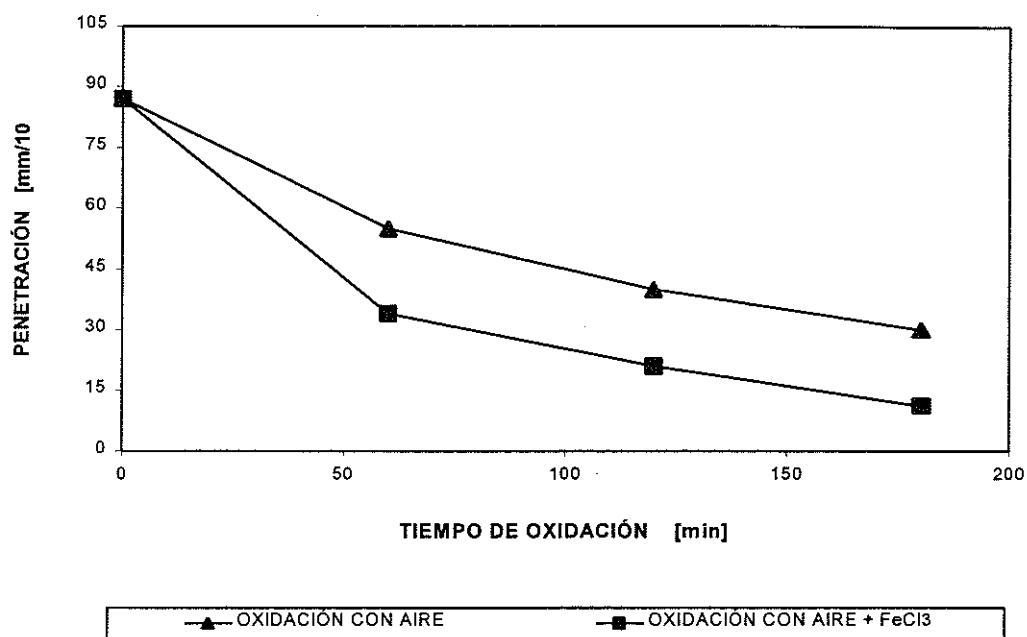
Las constantes de velocidad de reacción  $K_0$  que se obtuvieron fueron de  $0.0103 \text{ h}^{-1}$  para la modalidad sin catalizador y  $0.034 \text{ h}^{-1}$  para la modalidad con catalizador  $\text{FeCl}_3$ . Dichos datos se ajustan completamente a los reportados en el trabajo (9) y muestran la gran influencia que ejerce el catalizador, en la reacción de oxidación.

El uso del catalizador en los procesos de oxidación de asfalto es provechoso ya que reduce el tiempo de oxidación hasta en un 40%, confirmando de esta forma lo reportado en otros trabajos. Esto se puede observar en la Figura 3, para obtener un asfalto con un valor de penetración de 35 [mm/10] se necesita oxidar durante 150 minutos, pero si se hace en presencia del catalizador  $\text{FeCl}_3$  se obtiene a los 60 minutos.

La oxidación del asfalto CIB con oxígeno del aire, con y sin la presencia de catalizador suministra un producto mejorado que además el de servir para uso industrial también sirve para usarse como cemento asfáltico en mezclas para pavimentos.



De acuerdo con las especificaciones de ASTM D-946 para uso del cemento asfáltico en pavimentos, se encontró que asfalto CIB oxidado cumple con los valores mínimos de penetración (40 – 50 mm/10) y punto de chispa (>485 K) dados por dicha norma.



**Figura 3.** Penetración vs Tiempo de Oxidación para el Asfalto CIB Oxidado

Con tiempos de oxidación de 90 minutos para la oxidación del asfalto CIB con oxígeno del aire y de 40 minutos para la oxidación del asfalto en presencia de FeCl<sub>3</sub>, se logra obtener un asfalto oxidado que cumpla con los requerimientos mínimos de penetración exigidos para su aplicación en la construcción de carreteras.

### ABSTRACT

In this work is presented the experience of the assembly of a Colombian asphalts oxidation plant at semipilot level with air oxygen without catalyst and at catalyst presence. The catalytic oxidation of the Barrancabermeja Industrial Complex asphalt has been realized using FeCl<sub>3</sub> as catalyst.

## AGRADECIMENTOS

Se reconoce el aporte financiero otorgado por la Corporación para la Investigación y Desarrollo en Asfaltos en el Sector Transporte e Industrial CORASFALTOS.

## REFERENCIAS

1. The asphalt Handbook. Asphalt Institute. Manual Series. USA, No. 4, 1989, 85p.
2. Ortensa M. Asfaltos – Material de Construcción de Alta Tecnología. Visión Tecnológica. INTEVEP S.A. Venezuela, Vol. 1, No. 2, 1994, pp. 73–78.
3. Afanasieva N. Intensificación de la Producción de Asfaltos del petróleo. Chemistry and Technology Oil and Gas. No.8, 1986, pp.3-6.
4. Afanasieva N. and Goureev A. Calidad de los Asfaltos Oxidados y los Fondos de Vacío y Materiales en su Base. Chemistry and Thecnology Oil and Gas, No. 6, 1995, pp.8-14.
5. Broch Y. y Don M. Oxidación de Asfaltos. Boletín Técnico T– 103 S ASTEC, USA, 1996.
6. Afanasieva N., Serebriakov A. and Gun R. Intensificación de los Procesos de Obtención de Asfaltos Oxidados. Noticias de Ciencias del Petróleo y del Gas, No. 6, 1985, pp.45-47.
7. Rodríguez Y., Aponte G. y Krasuk J. Tendencias Actuales en Asfaltos Industriales para Techos. 1º Congreso Venezolano del Asfalto. Trabajos Técnicos. Caracas, 1996, pp. 205-226.
8. Mrowiec M. and Tabis B. Selected Problems of Kinetics in the Asphalt Oxidation Process. Nafta, Vol. 35, No.3, 1979, pp. 91-94.
9. Afanasieva N. Influencia de las Propiedades Físicoquímicas y Tamaño de las Partículas Coloidales de las Materias Primas en la Calidad de los

- Asfaltos Oxidados. Tesis doctoral, Academia de Gas y Petróleo. Moscú, Rusia, 1986, 213p.
10. Gun R. B., Pazhitnova N. P., Shopina N. M., Ivanyukov D. V., Kaminski E. F. and Shabalina L. N. Dependence of the Oxidation of Residual Petroleum Asphalt on Air Consumption in the Presence of Iron (III) Chloride. *Khimiya y Tekhnologiya Topliv i Masel*. No. 2, 1977, pp. 27-30.
  11. Lockwood D. C. Determine Asphalt Blowing Kinetics. *Petroleum Refiner*. 1959, pp.197-200.
  12. Afanasieva N. and Petchenyi B. Cambio de la Calidad de los Asfaltos en los Regímenes Cíclicos de Explotación. **Revista de la Academia Económica Técnica**. Moscú, 1995.
  13. Afanasieva N. Influencia de las Características Estructuro - Reológicas de Cargas de Crudos en los Procesos de Oxidación de Asfaltos. *Refinación y Petroquímica*, No. 2, 1985, pp.12-14.
  14. Quddus M. A. And Khan F. Factors Influencing Asphalt Oxidation. *Fuel*, Vol. 69, 1990, pp. 509-511.
  15. Páez J. Diseño Básico de una Planta Banco para la Oxidación de Asfaltos. Tesis de Grado de Ingeniería Química, UIS. Bucaramanga, 1990, 185p.
  16. Fort J. Blown Asphalts. British Petroleum Co. LTD. Brit. Patent No. 916.531. Jan, 1963, 5p.
  17. Hanson R. A. Catalytic Air Blown Asphalt. The Union Oil Company of California. U.S.A.,. Patent No. 3.258.419. June 1966, 6p.
  18. Afanasieva N. and Petchenyi B. Sobre la Calidad de los Asfaltos en Rusia y Colombia. XXV Conferencia Científico – Práctica sobre los Resultados de investigación en los Asfaltos. Rusia, 1995. 12p.
  19. Grudnikov I.B., Shestakov V.V., Mingaraev S.S. and Kolesnikov Yu. A. Intensification of the Process of the Production of the Oxidized Bitumen by Means of Porous Air Dispersers. *Khimiya i Tekhnologiya Topliv i Masel*, No.8, 1993, 7p.

20. Carreño M.T. y Díaz E. Montaje de un reactor Discontinuo a Nivel semipiloto para la Oxidación de Asfaltos Colombianos. Tesis de Grado de Ingeniería Química, UIS. Bucaramanga, 1997, 180p.
  21. Karen S. and Colin R. Kinetics on the Thermo-oxidative and Thermal Cracking Reactions of Athabasca Bitumen. Fuel. Vol 64, 1985, pp.1591-1597.
  22. Milan T. and Tse D. Oxidation and Photooxidation of Asphalts. Symposium on Chemistry and Characterization of Asphalts Presented before the Divisions of Petroleum Chemistry, Inc, and Fuel Chemistry American Chemical Society. Washington D. C., 1990, pp. 483-489.
  23. Colin R. and It-Chin H. Oxidation Reactions Kinetics of Athabasca Bitumen. Fuel, Vol 64, 1985, pp. 885-994.
- Giavarini C. Stability of Bitumens Produced by Thermal Processes. Fuel, Vol. 60, 1981, pp. 401-403.