



---

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**LÁTEX PARA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS III: COPOLÍMERO ACETATO  
DE VINILO - ACRILATO DE BUTILO. EFECTO DE LA CARBOXILACIÓN Y  
TAMAÑO DE PARTÍCULA**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTA:**

**JOSÉ DE JESÚS CASTELÁN HERNÁNDEZ**



**MÉXICO, D.F.**

**2014**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

---

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:** Profesor: JOAQUÍN PALACIOS ALQUISIRA

**VOCAL:** Profesor: MARCO ANTONIO URESTI MALDONADO

**SECRETARIO:** Profesor: CARLOS GUZMÁN DE LAS CASAS

**1er. SUPLENTE:** Profesor: FRANCISCO LOPEZ SERRANO RAMOS

**2° SUPLENTE:** Profesora: MA. GUADALUPE LEMUS BARAJAS

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: LABORATORIO 324, EDIFICIO D,  
FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM.**

**ASESOR DEL TEMA:**

CARLOS GUZMÁN DE LAS CASAS

**SUSTENTANTE:**

JOSÉ DE JESÚS CASTELÁN HERNÁNDEZ

---

## **Agradecimientos**

Estos años en la Universidad han cruzado en mi camino muchas personas, las cuales influyeron parte de lo que ahora soy, algunas mucho más que otras ya sea para bien o para mal. Lo cierto es que gracias a ellos he podido terminar, al fin, lo que empecé hace algunos años.

En primer lugar quiero agradecer a mis padres por darme las herramientas necesarias para mi superación personal y profesional, en especial a mi madre por ser un gran apoyo y presionarme, gracias por no dejarte abatir.

A mis tíos Sofía y Alejandro por sus consejos y ser el primer apoyo que tuve al inicio de esta etapa universitaria.

A mis tíos Teresa y Armando por todos aquellos momentos de alegría, consejos, por consentirme y brindarme su cariño y apoyo incondicional.

A Ana, Salvador, Axel y Elías por ser garantía de pasar un rato agradable. Gracias por su confianza y el gran apoyo brindado en el momento más difícil de mi vida hasta ahora.

Gracias a mis amigos de la Facultad: Tlaca, Samuel, Cindy, Isa, Amparo, Pedro, Claudia, Mariana, Iván, Nico, Ztichk; gracias por todos los momentos de alegría, tristeza, por su apoyo y consejos, gracias por hacer un poco menos difícil mi paso por la FQ, a la cual también agradezco.

Y por supuesto no podía faltar mencionar mi asesor M. en C. Carlos Guzmán, agradezco todas sus enseñanzas, anécdotas y consejos. Al Dr. Joaquín Palacios y al M. en C. Marco Uresti por sus correcciones a este trabajo, a la maestra Natalia de la Torre por su colaboración en la obtención de la CMC de los tensoactivos.

Quiero hacer un agradecimiento más al Dr. Rafael García del CIP, por su asesoría y apoyo en la elaboración de los látex.

*Gracias totales.....*

---

# ÍNDICE

Notación	iii
INTRODUCCIÓN	1
Hipótesis.	4
Objetivos.	4
1 BASES TEÓRICAS	5
1.1 Definición de polímero	5
1.2 Mecanismos de polimerización.	6
1.3 Homopolimerización	12
1.4 Copolimerización	14
1.6 Reacciones de copolimerización	18
1.7 Auto aceleración (Efecto Trommsdorff Norrish-Smith)	20
1.8 Procesos de polimerización.	20
1.9 Generalidades sobre Suelos	21
2. POLIMERIZACIÓN EN EMULSIÓN.	25
2.1 Antecedentes.	25
2.2 EL MODELO HARKINS.	26
2.2.1 OBJECIONES A LA TEORÍA DE HARKINS.	29
2.3 EMULSIFICANTES.	30
2.3.1 CLASIFICACIÓN DE LOS EMULSIFICANTES.	31
2.3.2 ESTABILIZACIÓN DE LOS SISTEMAS COLOIDALES.	32
2.3.3 FORMADOR DE MICELAS.	33
2.4 VARIABLES EN EL PROCESO DE EMULSIÓN	34
2.4.1 TEMPERATURA.	34
2.4.2 pH.	35
2.4.3 AGITACIÓN.	35

---

2.4.4 RAPIDEZ DE DOSIFICACIÓN DEL MONÓMERO.	36
<b>3 MODELO EXPERIMENTAL</b>	<b>38</b>
3.1 Diseño Experimental	38
3.2 Equipo y Reactivos.	39
3.3 Condiciones Experimentales.	40
3.4 Procedimiento.	41
3.5 Avance de reacción por gravimetría.	43
3.6 Pruebas de Compresión.	44
<b>4. RESULTADOS</b>	<b>47</b>
4.1 Caracterización de la tierra	47
4.2 Caracterización de los tensoactivos y cálculo de la CMC.	48
4.3 Caracterización de Látex.	53
4.4 Pruebas de Compresión de probetas Tierra – Látex.	74
<b>5. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES.</b>	<b>77</b>
5.1 Análisis de Resultados	77
5.2 Conclusiones.	79
5.3 Recomendaciones.	80
<b>ANEXO I. Hojas de Seguridad</b>	<b>82</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.</b>	<b>86</b>

---

## Notación

%NV	Porcentaje de No Volátiles o Sólidos
·R	Radical libre
°C	Temperatura en Centígrados
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTM	American Society for Testing Materials
BA	Acrilato de Butilo
CMC	Concentración Micelar Crítica
DSC	Calorimetría Diferencial de Barrido
E1	Emulsificante no Iónico: Surfapol EL30®
E2	Emulsificante Iónico: Disponil FES 993®
G	Gramo
GPC	Cromatografía de Permeación en Gel
Hr	Hora
I	Iniciador
$K_d$	Constante de Rapidez de disociación de iniciador ( $L mol^{-1} s^{-1}$ )
$K_i$	Constante de rapidez para el paso de iniciación. ( $L mol^{-1} s^{-1}$ )
$K_p$	Constante de rapidez de propagación. ( $L mol^{-1} s^{-1}$ )
KPS	Persulfato de Potasio
$K_t$	Constante de rapidez de terminación. ( $L mol^{-1} s^{-1}$ )
$K_{tc}$	Constante de rapidez de terminación por adición. ( $L mol^{-1} s^{-1}$ )
$K_{td}$	Constante de rapidez de terminación por desproporción. ( $L mol^{-1} s^{-1}$ )
$K_{tr}$	Constante de rapidez de transferencia de cadena. ( $L mol^{-1} s^{-1}$ )
L	Litro
MAA	Ácido Metacrílico
$M_{ch}$	Masa Charola
$M_H$	Masa muestra Húmeda
min.	Minuto
$M_n$	Peso Molecular Promedio en Número
Mol	Mol = $6.022 \times 10^{23}$ moléculas.
$M_s$	Masa muestra Seca
$M_w$	Peso Molecular Promedio en Peso
N	Número de moles
nm	Nanómetros
PDI	Polidispersidad
$P_m$	Cadena en crecimiento formada por m unidades monoméricas
$P_n$	Cadena en crecimiento formada por n unidades monoméricas
Psi	Libra por pulgada cuadrada
S	Segundo
SBR	Hule Estireno - Butadieno
T	Tiempo
VAM	Acetato de Vinilo
W	Agua
Mm	Micrómetro
$\mu S$	MicroSiemens
X	Conversión.
$K_d$	Constante de Rapidez de disociación de iniciador ( $L mol^{-1} s^{-1}$ )

---

## INTRODUCCIÓN

El interés científico e industrial por polimerizar dos o más monómeros vía radicales, tuvo sus orígenes alrededor de 1920 convirtiéndose en un método muy apropiado para desarrollar materiales con un uso final específico o una aplicación determinada, dadas las propiedades que imparten cada uno de los monómeros al polímero final.

Hoy en día, uno de los procesos de copolimerización más empleados es el llevado a cabo en emulsión, en el que los monómeros son inicialmente emulsificados en agua para producir una dispersión coloidal de partículas poliméricas, conocida como látex. Además de generar un copolímero con características propias, la síntesis en emulsión permite el control de la morfología y estructura de las partículas de látex, incrementando las propiedades y el desempeño del material.

A nivel industrial es común la utilización de monómeros vinílicos, acrílicos, estirénico, uretánicos entre otros, que en combinación generan una amplia gama de propiedades para la síntesis de un material.

En particular dentro de los monómeros altamente solubles en agua sobresalen aquellos con cierto tipo de funcionalidad adicional a la doble ligadura, conocidos como monómeros funcionales. Estos monómeros permiten producir látex funcionalizados, los cuales presentan características específicas y ofrecen mejor desempeño en adhesividad, flexibilidad, elasticidad, resistencia química, etc. Muchas de las formulaciones empleadas en la síntesis de látex tienden a emplear pequeñas cantidades de este tipo de monómeros funcionales, ya que son suficiente para modificar las propiedades finales. Para este caso de estudio se incorporará como monómero funcional el Ácido Metacrílico el cual contiene un grupo carboxílico que proporciona adhesión entre las partículas de polímero y las partículas de tierra.



---

Según Chernovetzky (2002) en la República Mexicana existen más de 100,000 Km de caminos de terracerías y se siguen atendiendo las demandas de nuevas rutas de caminos rurales de tal manera que, conforme avanza el desarrollo del país, se requiere de una modernización de dichas vías; Esto se puede lograr mediante consolidación de suelos por compactación, y si es con alguna sustancia química (como un aglutinante) aumenta la “vida útil” del camino, ya que aumenta la resistencia al viento, a la lluvia y a corrientes de agua.

Sin embargo, la difícil tarea de construir y reconstruir caminos a bajos costos, hace imposible conservar una mayor longitud de la red. Es por esto que existe la necesidad de buscar nuevas tecnologías que permitan modernizar los caminos a un menor costo que con los métodos tradicionales.

Aprovechando la propiedad de aglutinamiento y el carácter adhesivo de algunos polímeros, estos se emplean como agentes anti polvo, lo cual consiste en regar una dispersión diluida del polímero en la zona con la finalidad de evitar polvaredas en terrenos terregosos, las partículas del polímero ocasionan que las partículas de tierra se unan y sea difícil que en presencia de corrientes de aire estas se levanten fácilmente del suelo.

Otro uso es brindarle dureza y estabilidad al suelo, para que de ese modo disminuya su tendencia a fluir, tal es el caso de los taludes de tierra donde el material polimérico se emplea como consolidante.

Una ventaja al emplear látex base de monómeros acrílicos como consolidantes de suelo, es que al mismo tiempo de estabilizar los suelos les confiere una propiedad de elasticidad, debida al carácter elastomérico de la partícula del polímero que une a las partículas del suelo.

El objetivo primordial de este proyecto, es sintetizar un polímero vinil-acrílico que pueda usarse como agente aglutinante y permita cambiar las propiedades de los suelos evitando así agrietamientos, derrumbes y tolvaneas.

---

El polímero requerido para la estabilización de suelos debe cumplir con ciertas especificaciones: que sea elástico, que aglomere partículas, que sea resistente y con baja viscosidad.

Debido a esto, en el presente trabajo se estudia el efecto en la composición y cantidad de emulsificante en la copolimerización de acetato de vinilo (VAM), acrilato de Butilo (BA), carboxilado con ácido meta acrílico (MAA). Enfocándose en los efectos que el ácido Metacrílico tendrá sobre la adhesión de las partículas de tierra y filtración del suelo, además de la caracterización del copolímero.

En el capítulo uno y dos se expone de manera breve y condensada los fundamentos principales del concepto de polímero, polimerización por radicales libres y polimerización en emulsión y, además, se habla de los conceptos fundamentales del suelo, clasificación y estabilización de suelos.

En el capítulo tres se expone el diseño experimental, técnicas empleadas, características del equipo utilizado, condiciones de reacción, y descripciones de los equipos empleados, así como de las pruebas efectuadas.

El capítulo cuatro muestra los resultados obtenidos de la síntesis y caracterizaciones de los productos realizados, además en esta sección se analizan y discuten los resultados obtenidos, dando una posible explicación a los sucesos ocurridos.

---

## **Hipótesis.**

El látex sintetizado por Copolímero Acrilato de Butilo/Acetato de Vinilo, carboxilado con Ácido Metacrílico tendrá la capacidad de modificar y mejorar las capacidades de estabilización de un suelo.

El tamaño de partícula, la composición y la carboxilación del látex tendrá efecto en la estabilización del suelo y en la cinética de la reacción.

La adición de Ácido Metacrílico permitirá que las partículas de látex se adhieran mejor a las partículas de tierra.

La adición de emulsificante comercial tendrá la capacidad de mantener estable la dispersión coloidal en todo momento, además de poder modificar el tamaño de partícula modificando la cantidad de emulsificante adicionado.

## **Objetivos.**

Sintetizar un copolímero en emulsión, en proceso semi continuo, el cual tenga la capacidad de estabilizar un suelo, mejorando la resistencia al flujo, compresión y dispersión de partículas de tierra.

Conocer la proporción adecuada de los monómeros, la cantidad de emulsificante ideal y la estrategia de adición de MAA la cual represente un máximo desempeño para la estabilización de un suelo.

Encontrar la cantidad mínima de emulsificante suficiente, capaz de estabilizar el proceso en todo momento y obtener un tamaño de partícula nanométrico.

Realizar la caracterización del látex mediante DSC, tamaño de partícula por difracción de luz y peso molecular por GPC.

Realizar las pruebas de compresión de probetas de mezclas tierra-látex.

Seguir la cinética de reacción de polimerización mediante gravimetría para obtener los perfiles de conversión.

---

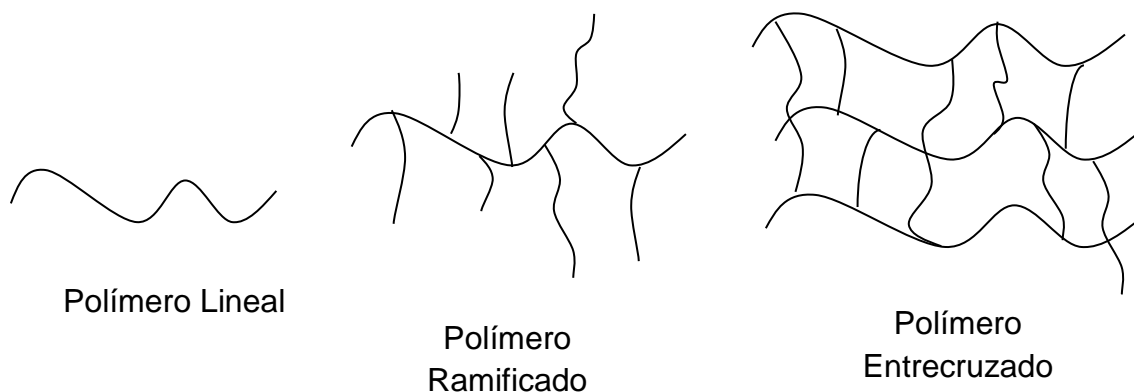
# 1 BASES TEÓRICAS

## 1.1 Definición de polímero

Un polímero es un compuesto formado por la unión entre moléculas simples más pequeñas. Las moléculas pequeñas que reaccionan entre ellas para formar un polímero son llamados monómeros, y la reacción por la cual se combinan para transformarse en polímeros se denomina polimerización.<sup>1</sup> Existen polímeros naturales, sintéticos y modificados; los primeros polímeros usados como materiales fueron productos naturales como el algodón, resinas naturales, seda y lana.

Químicamente, los polímeros son moléculas en forma de cadena, de un peso molecular relativamente alto, típicamente del orden de decenas de miles. Por esta razón, el término macromoléculas es usado frecuentemente para hacer referencia a materiales poliméricos.

Su estructura y propiedades fisicoquímicas dependen principalmente de sus monómeros constitucionales, tamaño y su arreglo tridimensional. La repetición de las unidades constitutivas dependerá de las condiciones de reacción y de la naturaleza química de dichas unidades, la repetición puede ser lineal, ramificada o entrecruzada (figura 1.2).



**Figura 1.1** Formas de las cadenas poliméricas

---

## 1.2 Mecanismos de polimerización.

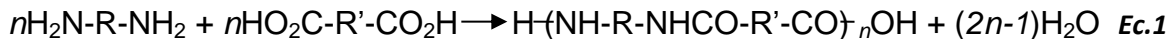
Durante el desarrollo de la ciencia de los polímeros, dos tipos de clasificaciones se han venido usando. Una clasificación es basada en la estructura del polímero y divide a los polímeros en polímeros de condensación y adición. La otra clasificación es basada en los mecanismos de polimerización y divide las polimerizaciones por paso y en cadena.<sup>1</sup> Por lo que la clasificación queda basada en dos categorías fundamentales:

- Polimerización por pasos o por condensación.
- Polimerización por adición o de crecimiento en cadena.

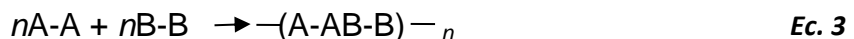
### 1.2.1 Polimerización por pasos.

La polimerización por pasos se divide en dos grupos dependiendo del tipo de monómeros empleados. La primera involucra dos diferentes monómeros bifuncionales (Un monómero es bifuncional cuando tiene dos grupos funcionales por molécula) o polifuncionales (Un monómero es polifuncional cuando tiene más de dos grupos funcional por molécula), en la cual cada monómero posee únicamente un tipo de grupo funcional. La segunda involucra un monómero simple que contiene ambos tipos de grupos funcionales.<sup>1</sup>

Un ejemplo claro que ilustra ambos grupos de reacciones es la formación de poliamida, la cual se puede obtener mediante la reacción entre un diácido y una diamina (Ec. 1), o de la reacción entre aminoácidos (Ec. 2).



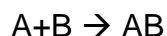
Los grupos de reacciones mencionados anteriormente pueden ser representados de manera general por las ecuaciones 3 y 4.



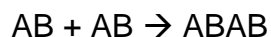
---

La principal característica de una polimerización por pasos, es que cualquiera de las dos especies, en una mezcla de reacción, puede reaccionar una con la otra. Para ilustrar esto, considérese la síntesis de un poliéster proveniente de la reacción entre un diácido y un diol.

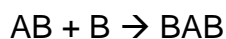
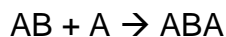
El primer paso de la reacción, es la reacción entre los monómeros diácido y diol para formar un dímero.



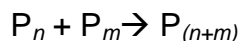
Un segundo paso es la reacción entre un dímero con otro dímero para formar un tetrámero.



O bien, la reacción entre un dímero y un monómero diácido o un monómero diol para formar un trímero.



Estas reacciones se pueden generalizar como:



Donde  $P_n$  es una cadena en crecimiento formada por  $n$  unidades monoméricas y  $P_m$  es una cadena en crecimiento formada por  $m$  unidades monoméricas. De este modo, la longitud de cadena es construida en pasos por reacciones entre cualquiera de las dos cadenas en crecimiento. La cadena formada es tan reactiva como el monómero que la formó.

En este mecanismo de polimerización, el peso molecular no se incrementa hasta que casi todo el monómero ha reaccionado. Por lo que para producir un polímero de alto peso molecular se necesita una alta conversión de monómero. Una de las características más importantes de este tipo de polimerización es que se obtienen subproductos de bajo peso molecular (el agua es el más habitual). Esta agua puede hidrolizar el producto generado en la policondensación, por lo que el proceso de polimerización es de alguna forma reversible. Para alcanzar un alto grado de conversión es necesario eliminar ese subproducto.<sup>4</sup>

---

En la polimerización por etapas, el tipo de producto obtenido se determina por la funcionalidad de los monómeros, si se tienen monómeros monofuncionales se obtendrán especies de bajo peso molecular, si se tienen monómeros bifuncionales se obtendrán polímeros lineales y los monómeros polifuncionales pueden producir cadenas lineales, ramificadas y entrecruzadas.

### **1.2.2 Polimerización radicalica en cadena**

La polimerización en cadena es generalmente el resultado de la apertura del doble enlace existente en muchos compuestos monoméricos, aunque algunos compuestos como los éteres cíclicos y los aldehídos también se polimerizan en cadena, aunque la mayor parte de reacciones de adición son del tipo vinílicas.

La ruptura del enlace estará determinada por la estructura del monómero, por las condiciones de reacción y sobre todo por la acción de un iniciador, que es un agente intermediario de transición que activa la densidad electrónica del monómero de forma que rompe el doble enlace en una manera homolítica o heterolítica. En el caso de la ruptura homolítica se generan radicales, y en el segundo caso dependiendo del carácter electrófilo o nucleófilo del iniciador se generan cationes o aniones que condicionan el desarrollo de las cadenas en crecimiento.

De estos procesos, la polimerización por radicales libres es la más importante puesto que un gran número de polímeros sintetizados se producen por esta vía, las razones fundamentales recaen en que la mayor parte de los monómeros vinílicos y acrílicos polimerizan vía radicales libres, además que la polimerización puede llevarse a cabo a temperaturas bajas, entre temperatura ambiente y 100°C y no se requiere alta pureza en los reactivos para que la reacción se efectúe eficientemente.

El efecto global de la polimerización es abrir enlaces y efectuar un reordenamiento para crear esencialmente secuencias lineales de unidades de monómeros reaccionando que se transforman en unidades estructurales. En esta

---

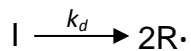
forma simple, la polimerización por adición de un compuesto con carbón insaturado puede representarse de la siguiente manera:

### **Monómero → Unidad Estructural**

Los radicales libres comienzan a sufrir reacciones de propagación, uniéndose a la molécula de monómero por la apertura del enlace pi para formar un nuevo radical. El proceso se repite conforme las moléculas de monómero se van añadiendo sucesivamente con gran rapidez y el peso molecular de esa unidad aumenta rápidamente. En consecuencia, la concentración de monómero disminuye constantemente a lo largo de la reacción. Además un tiempo de reacción prolongado tiene poco efecto sobre el peso molecular, pero permite obtener mayores rendimientos, aunque cabe mencionar que en cualquier momento de la reacción se tiene monómero sin reaccionar, cadenas completas de polímero y una baja concentración de cadenas en formación. Durante esta etapa, puede ser que haya un radical polimérico que extraiga un átomo de hidrógeno de una cadena de polímero ya terminada (Caso más común de la polimerización radicalica no controlada). Por lo que esta cadena de polímero terminada pasa a ser un radical y comienza de nuevo su crecimiento dando lugar a una ramificación.

La polimerización por adición es entonces una reacción en cadena que consiste en una secuencia de tres pasos: iniciación, propagación y la terminación

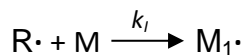
Este tipo de polimerización es iniciada usualmente por un compuesto llamado iniciador (**I**) que da lugar a especies reactivas (**·R**). Las especies reactivas pueden ser radicales libres, cationes o aniones que se adicionan a la molécula de monómero para abrir el enlace pi y formar un nuevo radical, catión o anión. La iniciación en **R·** contempla dos reacciones. La primera es la producción de radicales libre, resultada de la disociación homolítica de un iniciador o especie catalítica **I** para producir un par de radicales **R·**.



Donde  $k_d$  es la constante de rapidez para la disociación del iniciador.

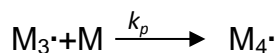
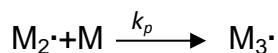
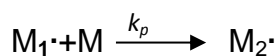


La segunda parte de la iniciación involucra la adición de este radical a la primera molécula de monómero para producir la cadena iniciante de especies  $M_1\cdot$ .

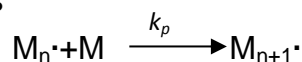


Donde M representa una molécula de monómero y  $k_i$  es la constante de rapidez para el paso de iniciación.

La propagación consiste en el crecimiento de  $M_1\cdot$  por adiciones sucesivas de moléculas de monómero. Cada adición crea un nuevo radical que tiene la misma identidad que el anterior, excepto en que éste es mayor por una unidad estructural. Las adiciones sucesivas pueden representarse así:

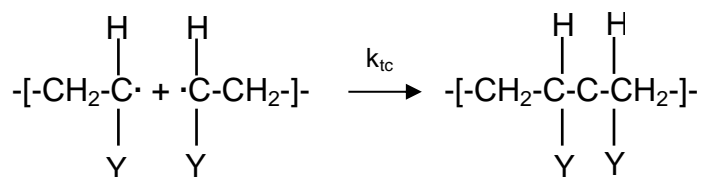


O en términos generales

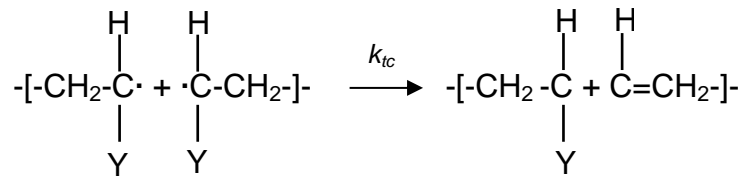


Donde  $k_p$  es la constante de rapidez de propagación. La propagación con crecimiento de la cadena a altas longitudes de cadena se lleva a cabo rápidamente. Los valores de  $k_p$  para gran parte de monómeros están en el intervalo de  $10^2$  y  $10^4$  L·mol<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup>. Siendo esta una constante de rapidez grande, mayor a las encontradas en las polimerizaciones por pasos. Cabe señalar que  $k_p$  se considera que no es función del tamaño de cadena.

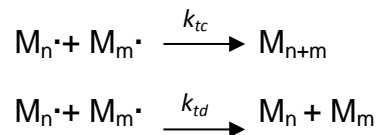
En algún punto, la cadena activa de polímero termina. La terminación con aniquilación de los radicales ocurre por reacción bimolecular entre los radicales. Dos radicales reaccionan uno a otro por combinación o adición:



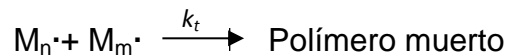
La terminación puede darse por dismutación, en otros casos en los cuales un radical hidrógeno en posición beta a un centro radical es transferido a otro centro radical. Esto resulta en la formación de dos moléculas de polímero, una saturada y otra insaturada.



La terminación también puede ocurrir por una combinación de adición y dismutación. Los dos diferentes modos de terminación puede representarse en términos generales como:



Donde  $k_{tc}$  y  $k_{td}$  son las constantes de rapidez para la terminación por adición y dismutación respectivamente. El paso de terminación también se puede expresar por:

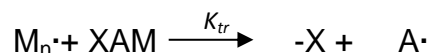


Donde el modo particular de terminación no se especifica y  $k_t = k_{tc} + k_{td}$ . El término de polímero muerto, significa el cese de crecimiento de los radicales propagantes. La reacción de propagación seguirá indefinidamente hasta que todo el monómero en un sistema de reacción se agote sino hubiera una fuerte tendencia a la terminación. Cabe destacar que las constantes de terminación típicas están en el intervalo de  $10^6$  a  $10^8 \text{ L}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$  u órdenes de magnitud mayores que las constantes de rapidez de propagación, un valor grande de  $k_t$  comparada con  $k_p$  no evita la propagación, porque las especies radicales están presentes en concentraciones muy bajas y además la rapidez de polimerización depende solo a la media potencia negativa de  $k_t$ .

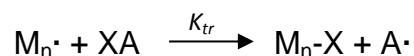
En muchos sistemas de polimerización, se observa que el peso molecular del polímero es más bajo que el predicho en base a las cantidades observadas experimentalmente en la terminación por adición y dismutación. Este efecto se

---

debe a la terminación prematura de una cadena de polímero en crecimiento, por la transferencia de hidrógeno u otro átomo o especie similar a éste, de algún compuesto presente en el sistema como puede ser el monómero, el iniciador, o el disolvente, según sea el caso. Estos desplazamientos de radicales se les denomina reacciones de transferencia de cadena y pueden representarse como:



Donde XA puede ser el monómero, el iniciador, el disolvente u otra sustancia, y la transferencia de cadena del polímero muerto; X es el átomo o la especie transferida y  $k_{tr}$  es la constante de rapidez de transferencia de cadena. La transferencia de cadena termina con la producción de un nuevo radical A, que después puede reiniciar la polimerización:



Donde  $k_a$  es la constante de rapidez de producción del nuevo radical, por lo tanto, la transferencia de cadena es una reacción de rompimiento de cadena que resulta en un decremento en el tamaño de propagación de la cadena polimérica, donde la excepción es cuando el polímero muerto reacciona con un radical, lo cual genera ramificaciones y puede en algunos casos llegar a la reticulación.

### 1.3 Homopolimerización

Cuando únicamente un monómero toma parte en la reacción de polimerización, las reacciones se denominan reacciones de homopolimerización. De acuerdo a Lenz (1968) "El crecimiento de la polimerización en cadena está basada en la aplicación de un radical libre o reacción iónica a la cadena de polimerización o macromolécula, y resulta de una propagación de una reacción en cadena.

Considérese una reacción de polimerización por radicales libres que involucre la iniciación, propagación, transferencia de cadena y terminación como se muestra continuación con sus reacciones y ecuaciones cinéticas.

Reacción	Ecuación de rapidez
Iniciación:	
$I \xrightarrow{k_d} 2R\cdot$ $R\cdot + M \xrightarrow{k_i} M_1\cdot$	$R_i = 2 f k_d [I]$
Propagación:	
$M_1\cdot + M \xrightarrow{k_p} M_2\cdot$ $M_2\cdot + M \xrightarrow{k_p} M_3\cdot$ $M_3\cdot + M \xrightarrow{k_p} M_4\cdot$ $M_n\cdot + M \xrightarrow{k_p} M_{n+1}\cdot$	$R_p = k_p [M\cdot][M]$
Transferencia de cadena:	
$M_n\cdot + XAM_n \xrightarrow{k_{tr}} A\cdot$	$R_{tr} = k_{tr} [M\cdot][XA]$
Reiniciación:	
$A\cdot + M \xrightarrow{k_a} M\cdot$	$R_a = k_a [A\cdot][M]$
Terminación:	
$M_n\cdot + M_m\cdot \xrightarrow{k_{tc}} \dots\dots$ $M_n\cdot + M_m\cdot \xrightarrow{k_{td}} P_m$	$R_t = 2k_t [M\cdot]^2$
Transferencia al polímero:	
$P_n + R_m\cdot \xrightarrow{K_{trp}} P_n\cdot$	

**Tabla 1.1** Cinética de polimerización

---

En donde I es iniciador,  $R\cdot$  son los radicales del iniciador,  $M_n\cdot$  el polímero de crecimiento de longitud n,  $XA$  la sustancia a donde se transfiere el radical,  $X$  el átomo o la especie transferida,  $A$  es el nuevo radical que reinicia la polimerización y  $D$  es el polímero muerto.

#### 1.4 Copolimerización

Cuando una polimerización se lleva a cabo en presencia de dos o más monómeros, el producto que se obtiene es una cadena formada por la sucesión de esas diversas unidades estructurales, combinadas en formas muy diversas, dependiendo de la concentración de los monómeros y sus reactividades relativas.

Aunque la polimerización de los compuestos orgánicos es conocida desde hace más de un siglo, la polimerización simultanea de dos o más monómeros no se investigó hasta aproximadamente 1911, cuando se encontró que los copolímeros de las olefinas y diolefinas tenían propiedades del tipo de los cauchos. Es importante decir que el copolímero no es una aleación de dos homopolímeros, sino que contiene unidades estructurales provenientes de la reacción en cada molécula de copolímero. El proceso puede ser representado como:

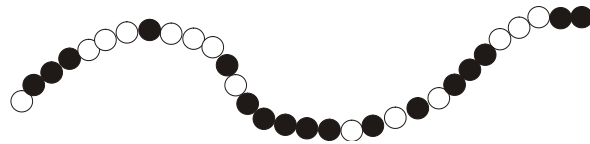


De acuerdo a la naturaleza del monómero y dependiendo de la técnica que se utilice, la estructura del copolímero se puede inferir.

Dependiendo de las diferentes estructuras que se obtienen de un copolímero, se clasifican en: alternados, injertados, al azar, en bloque y entrecruzados.

#### 1.5 Clasificación de copolímeros según su estructura

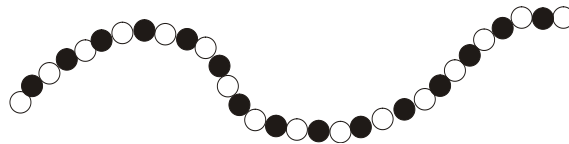
**Copolímeros al azar:** Son producidos en masa, solución, suspensión y emulsión; se emplean iniciadores de tipo peróxido o redox para generar radicales libres, aunque también se pueden producir de diferentes maneras.



AABABAAABABAABBBAA

*Figura 1.3 Copolímeros al azar*

**Copolímeros alternados:** Son producidos mediante procesos específicos de polimerización. La reactividad de los monómeros polares se puede incrementar por complejos con haluros metálicos o haluros de aluminio orgánicos.

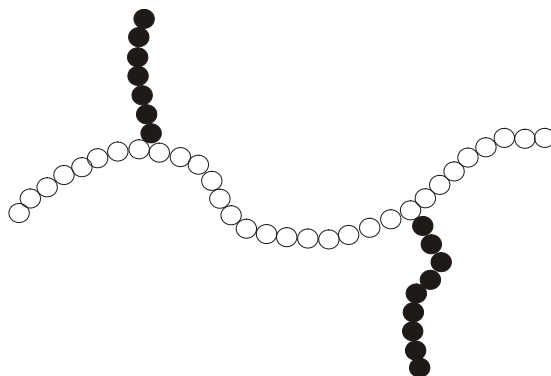


ABABABABABABABABABA

*Figura 1.4 Copolímeros alternados*

Estos monómeros acomplejados participan en la reacción transfiriendo un electrón con cada monómero no acomplejado y otro electrón lo adquiere del monómero.

**Copolímero injertado:** Son construidos por la formación de una cadena principal de estructura lineal (A) e injertos de cadenas aleatorias sobre la cadena principal (B). Este tipo de copolímeros injertados son producidos por polimerización aniónica, adición catiónica, o por radicales libres en presencia de otro monómero reactivo.



*Figura 1.5 Copolímero injertado*

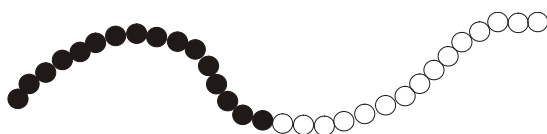
---

En los copolímeros injertados es difícil caracterizar sus estructuras, sobretodo la exactitud de la cantidad de polímero injertado y la longitud de los segmentos injertados.

**Copolímeros en bloque:** Este tipo de copolímeros son formados por la unión de monómeros químicamente diferentes conectados entre sí por segmentos terminales. Estos son producidos por una secuencia de polimerización mediante adición aniónica.

**AAABBBAAABBBAAAABBBBAAAABBBB** (multibloque)

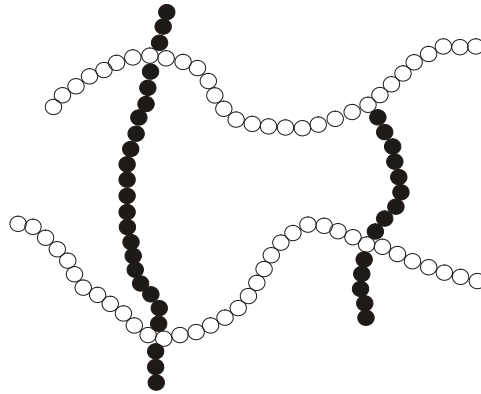
Estos copolímeros son más difíciles de caracterizar que los homopolímeros y los copolímeros estadísticamente uniformes. En los copolímeros en bloque A-B y en A-B-A son por definición de uno y dos puntos de unión respectivamente; mientras que  $-(A-B)_n$  – la distancia entre cada eslabón de la cadena pueden ser medidos mediante el conocimiento del peso molecular del bloque.



*Figura 1.6 Copolímeros en bloque (Dibloque)*

**Copolímeros entrecruzados:** Son producidos mediante la generación de radicales libres en los sitios donde se formó el prepolímero en presencia del o los monómeros. El entrecruzamiento ocurre en las cadenas de polímero que se formó uniéndose de forma acelerada a otras cadenas lineales unas con otras dando como resultado entrecruzamientos entre los monómeros.

Los copolímeros entrecruzados tienen estructuras de redes tridimensionales y por lo tanto son insolubles. El entrecruzamiento puede ser de la misma o diferente estructura la cuál ocurre en la misma cadena de polímero. El polímero entrecruzado que esta hinchado por un solvente se le denomina gel. La formación de geles ocurre a una conversión particular llamada punto gel.



**Figura 1.7** Copolímero entrecruzado.

Los polímeros entrecruzados se caracterizan por:

- i) Longitud de la cadena entrecruzada es el número de eslabones de cadena entre dos puntos de la red.
- ii) El punto de ramificación es el punto para que más cadenas se unan.
- iii) El peso molecular promedio en número de la cadena entrecruzada.

Cada uno de estos diferentes copolímeros tiene diferentes propiedades, por tal motivo es de gran importancia conocer la naturaleza de cada uno de los monómeros y sobre todo, la técnica óptima para obtener el copolímero con las propiedades deseadas.

La cantidad de los dos monómeros que forman al copolímero están determinadas por sus concentraciones y sus reactividades. Se pueden realizar polimerizaciones de dos o tres monómeros simultáneamente. Tal polimerización es llamada copolimerización multicomponente, el término de terpolimerización es usado para sistemas de tres monómeros.

El comportamiento de monómeros en copolimerización es útil para estudiar efectos de la estructura química sobre la reactividad. La copolimerización es también muy importante desde el punto de vista tecnológico. Se pueden obtener productos poliméricos con propiedades específicas deseadas. A diferencia de la homopolimerización, la cual es más limitada desde el punto de vista de propiedades mecánicas.

La copolimerización permite la síntesis de un número ilimitado de diferentes productos por la variación en la naturaleza y cantidades relativas de los dos



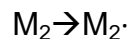
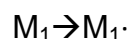
monómeros en el copolímero. Un ejemplo de la versatilidad de la copolimerización es el estireno. El poliestireno es un plástico quebradizo con poca resistencia al impacto y a los disolventes; en consecuencia tiene utilidad práctica muy limitada. La copolimerización y terpolimerización del estireno incrementa la utilidad del estireno; estos son útiles como plásticos y elastómeros. Por lo tanto la copolimerización del estireno con acrilonitrilo nos da un incremento en la fuerza de impacto y resistencia a solventes, mientras que la copolimerización con butadieno nos da propiedades elastoméricas. La terpolimerización del estireno con acrilonitrilo y butadieno, conocido como Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno (ABS) mejora las tres propiedades simultáneamente.

En 1936 Dostal estudió por primera vez el mecanismo de la copolimerización, suponiendo que la rapidez de adición de un monómero a un radical creciente depende solamente de la naturaleza del grupo terminal en la cadena radical. De este modo los monómeros  $M_1$  y  $M_2$  conducen a radicales del tipo  $M_1\cdot$  y  $M_2\cdot$ .

## 1.6 Reacciones de copolimerización

En el tratamiento cuantitativo de la copolimerización se tienen cuatro reacciones de propagación (En reactor por lotes):

### Iniciación:



### Propagación:

<i>Reacción</i>	<i>Rapidez</i>
$M_1\cdot + M_1 \rightarrow M_1\cdot$	$R_{11} = k_{11}[M_1\cdot][M_1]$
$M_1\cdot + M_2 \rightarrow M_2\cdot$	$R_{12} = k_{12}[M_1\cdot][M_2]$
$M_2\cdot + M_1 \rightarrow M_1\cdot$	$R_{21} = k_{21}[M_2\cdot][M_1]$
$M_2\cdot + M_2 \rightarrow M_2\cdot$	$R_{22} = k_{22}[M_2\cdot][M_2]$

---

**Terminación:**



Dado que intervienen cuatro constantes de rapidez independientes, Dostal no hizo ningún intento de probar su hipótesis experimentalmente.

Después de varios intentos infructuosos, la cinética de copolimerización fue elucidada en 1944 por Alfred, Mayo, Simba y Wall. Al esquema de reacción de Dostal añadieron la hipótesis del estado estacionario aplicado para cada tipo de radical separadamente, es decir, las concentraciones de  $M_1\cdot$  y  $M_2\cdot$  deben permanecer constantes. Se sigue de ello que la rapidez de conversión de  $M_1\cdot$  a  $M_2\cdot$  debe ser igual a la de la conversión de  $M_2\cdot$  a  $M_1\cdot$ .

Las rapidezces de desaparición de los dos monómeros están dadas por:

$$-\frac{d[M_1]}{dt} = k_{11}[M_1\cdot][M_1] + k_{21}[M_2\cdot][M_1]$$

$$-\frac{d[M_2]}{dt} = k_{12}[M_1\cdot][M_2] + k_{22}[M_2\cdot][M_2]$$

Definiendo los radios de reactividad.

$$r_1 = \frac{k_{11}}{k_{12}}; \quad r_2 = \frac{k_{22}}{k_{21}}$$

Combinando los radios de reactividad con las ecuaciones de desaparición de monómeros se obtiene que la composición del polímero formado en cualquier instante viene dada por:

$$\frac{d[M_1]}{d[M_2]} = \frac{[M_1](r_1[M_1] + [M_2])}{[M_2]([M_1] + r_2[M_2])}$$

Esta ecuación es conocida como la ecuación de composición instantánea del copolímero o ecuación de Lewis - Mayo. Otra forma de la ecuación es:

$$F_1 = 1 - F_2 = \frac{r_1 f_1^2 + f_1 f_2}{r_1 f_1^2 + 2f_1 f_2 + r_2 f_2^2}$$

---

$$F_1 = 1 - F_2 = \frac{dM_1}{d(M_1 + M_2)}$$

$$f_1 = 1 - f_2 = \frac{M_1}{M_1 + M_2}$$

Dónde:  $f$  es la fracción mol de cada monómero en la alimentación y  $F$  es la fracción mol de cada monómero en el copolímero.

### **1.7 Auto aceleración (Efecto Trommsdorff Norrish-Smith)**

Algunas polimerizaciones por radicales libres se caracterizan por la presencia de una auto aceleración en la rapidez de polimerización en función del grado de reacción. Normalmente se esperaría que la rapidez de reacción disminuyera con el tiempo, ya que la concentración de monómero decrece con la conversión; el efecto contrario es el que se observa en muchas polimerizaciones donde la rapidez se incrementa en cierto intervalo de conversión.

A este comportamiento se le conoce como auto aceleración, efecto “gel” o efecto Trommsdorff Norrish-Smith. Este efecto es causado por el decremento en la constante de rapidez de terminación con el incremento de la conversión. Cuando la polimerización prosigue, la viscosidad del sistema se incrementa y se afectan las constantes de propagación ( $k_p$ ) y la constante de terminación ( $k_t$ ), como consecuencia de este efecto se tiene el incremento en el peso molecular con la conversión.

### **1.8 Procesos de polimerización.**

Existen diferentes procesos para llevar a cabo una reacción de polimerización entre los cuales se tienen la polimerización: en masa, en solución, en suspensión y en emulsión.

Cada uno de estos procesos dependerá generalmente del uso final que se le dará al polímero y las características deseadas para su aplicación específica. A continuación se detallara el proceso de emulsión haciendo mención a los puntos más relevantes de este proceso.

---

## **1.9 Generalidades sobre Suelos**

El suelo, una mezcla variable de minerales, materia orgánica y agua capaz de mantener la vida vegetal en la superficie de la tierra. El suelo es el producto final de la acción de los procesos físicos, químicos y biológicos del intemperismo sobre las rocas, que produce principalmente minerales de arcillas. La porción orgánica del suelo consiste en biomasa de las plantas y animales en varias fases de descomposición. El suelo contiene espacios con aire y generalmente tiene una textura suelta.

La fracción sólida de un suelo típico tiene, aproximadamente, 5% de materia orgánica y el 95% restante de materia inorgánica. Los suelos típicos exhiben capas distintivas llamadas horizontes, con profundidad creciente. Los horizontes se forman como resultado de interacciones complejas entre procesos que ocurren durante el intemperismo. La capa superior del suelo, que tiene típicamente varios centímetros de espesor, es conocida como horizonte A, o mantillo. Ésta es la capa de mayor actividad biológica y contiene la mayor parte de materia orgánica. Los iones metálicos y las partículas de arcilla están sujetos a una considerable lixiviación. La siguiente capa es el horizonte B, o subsuelo. Ésta recibe material como materia orgánica, sales y partículas de arcilla lixiviadas del mantillo. El horizonte C está compuesto por las rocas originarias meteorizadas a partir de las cuales se generó el suelo.

### **1.9.1 Clasificación de suelos.**

Los suelos exhiben una gran variedad de características que se usan en su clasificación para varios propósitos, que incluyen la producción de cosechas, la construcción de caminos, la evacuación de desechos y los perfiles del suelo. Otras características del suelo incluyen la firmeza, la facilidad de labrado, el tamaño de partículas, la permeabilidad y el grado de madurez, que es reflejo de su composición.

Los suelos con propiedades similares se clasifican en grupos y subgrupos basados en su comportamiento ingenieril. Los sistemas de clasificación proporcionan un lenguaje común para expresar en forma concisa las

características generales de los suelos. Como previamente se comentó existen diversas clasificaciones, básicamente se emplean dos sistemas de clasificación que emplean la distribución por tamaño de grano, y la plasticidad de los suelos. Estos son el sistema de clasificación AASHTO y el sistema unificado de clasificación de suelos. La primera clasificación es empleada por los departamentos de caminos, mientras que los ingenieros geotécnicos emplean el sistema unificado.

**Clasificación de suelos  
según la Norma ASTM D-2487**

Grandes Divisiones		Grupo Símbolo	Los nombres típicos
<b>Suelos de grano grueso</b> Más del 50% retenido en el 0,075 mm (Núm. 200) tamiz	<b>Gravas</b> 50% o más, de fracción gruesa retenida en malla de 4,75 mm (Núm. 4)	Gravas Limpieza	GW Gravas finas bien clasificadas y mezclas de grava-arena, poco o nada de finos.
			GP Gravas pobremente graduadas y mezclas de gravas-arena, poco o nada de finos.
		Gravas con finos	GM Gravas sedimentosas, mezclas de gravas-arena-sedimentos.
			GC Gravas arcillosas, mezclas de grava-arcilla-arena.
	<b>Arenas</b> Mas del 50% de fracción gruesa pasa la malla de 4.75 mm(No. 4)	Arenas Limpias	SW Arenas bien clasificadas y arenas gravas, poco o nada de finos.
			SP Arenas mal clasificadas, arenas con gravas, poco o nada de finos.
		Arenas con finos	SM Arenas limosas, mezclas de arena y sedimentos
			SC Arenas arcillosas, mezclas arena-arcilla
<b>Suelos de grano fino</b> Más del 50% pasa a los 0,075 mm (Núm. 200) tamiz	<b>Sedimentos y arcillas</b> Límite líquido del 50% o menos	ML Limos orgánicos, arenas muy finas, polvo de roca, arenas finas limosas o arcillas.	
		CL Arcillas limosas orgánicas de baja a mediana plasticidad, arcillas con gravas, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas pobres	
		OL Sedimentos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad	
	<b>Limos y arcillas</b> Límite líquido superior al 50%	MH Sedimentos inorgánicos, arenas finas micáceas o diatomeas o limos, limos elásticos	
		CH Arcillas inorgánicas o alta plasticidad, arcillas grasas	
		OH Arcillas orgánicas de mediana a alta plasticidad	
<b>Los suelos altamente orgánicos</b>		PT Turba, rezaga de escombro y otros suelos altamente orgánicos	

Prefijo: G = Grava, S = Arena, M = limo, C = Arcilla, O = Orgánica  
 Sufijo: W = bien clasificado, P = mal clasificado, M = limoso, L = baja a media compresibilidad, H = alta compresibilidad

**Tabla 1.2 Clasificación de suelos unificada según ASTM.**

---

El sistema de clasificación de suelos AASHTO fue propuesto en 1929 como el sistema de clasificación de la oficina de caminos públicos, es el actualmente empleado y fue adecuado por la ASTM en la prueba ASTM D-3282, en la tabla 1.2 se puede ver la clasificación de la ASTM.

### **1.9.2 Compactación de suelos**

En la construcción de terraplenes para carreteras, presas de tierra y muchas otras estructuras de ingeniería, los suelos deben ser compactados para incrementar sus pesos específicos y sus propiedades mecánicas.

La compactación incrementa las características de resistencias de los suelos, aumentando la capacidad de carga. La compactación también disminuye la cantidad de asentamientos indeseables de las estructuras e incrementa la estabilidad de los taludes de los terraplenes.

La compactación es la densificación del suelo por remoción de aire, para lo que se requiere energía mecánica.

El contenido de agua tiene una gran influencia en el grado de compactación de un suelo, otros factores que afectan la compactación, son desde luego el tipo de suelo y el esfuerzo de compactación (energía por unidad de volumen unitario).

### **1.9.3 Estabilización de suelos.**

La estabilización de suelos es un concepto general que considera la mejora de las propiedades físicas y/o mecánicas de un suelo a través de procedimientos mecánicos y/o físico -químicos.

Un estabilizante es un producto químico, que puede ser natural de origen vegetal o sintético, que por su acción y/o combinación con el suelo, mejora una o más de sus propiedades de comportamiento, proporcionando al suelo consistencia y permeabilidad.

Los estabilizantes orgánicos se pueden obtener por ejemplo a partir de cascarilla o endospermo de semillas puras no tóxicas, naturales. Los

---

estabilizantes sintéticos están basados en polímeros líquidos que se combinan con otras sustancias auxiliares, como agentes de humidificación y secadores, una vez que el polímero se adhiere al suelo, este se descompone por oxidación, por el calor y radiación UV, degradándose a C, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y sustancias no dañinas para el medio ambiente.

Los estabilizantes sintéticos pueden estar compuestos de polímeros y tienen aplicación para el control de la erosión. Estos polímeros se presentan en forma de emulsión, o de polvo, adaptándose a todo tipo de irrigación por gravedad o por aspersión.

Entre las ventajas de emplear un estabilizante, se pueden citar algunas: Gracias al estabilizador, las finas partículas de la superficie cohesionan entre ellas. Al cambiar la porosidad del suelo, disminuyen los daños debidos a las salpicaduras por la irrigación por aspersión y la erosión bajo irrigación por gravedad. Disminuyen hasta un 95% las pérdidas de suelo debidas a escurrimiento y cambian la permeabilidad del suelo.

---

## **2. POLIMERIZACIÓN EN EMULSIÓN.**

En este capítulo, se describe la polimerización en emulsión vista desde un punto cinético cualitativo basada en el modelo Harkins. Hay otras teorías cualitativas sobre la polimerización en emulsión, pero se ha elegido la de Harkins no sólo por ser la más estudiada y seguida hasta la fecha, sino por ser la más intuitiva y gráfica.

Hay otros modelos que enfocan la polimerización en emulsión desde puntos de vista cuantitativos (como el de Smith-Ewart), donde se estudia la rapidez de reacción entre los monómeros en función de las concentraciones de los mismos, pero estos estudios se escapan del propósito de este trabajo.

### **2.1 Antecedentes.**

Desde la segunda guerra mundial, la polimerización en emulsión es una tecnología que crece rápidamente, dirigida hacia la producción de alternativas sintéticas a las gomas naturales. Hoy en día, es la base de una gran industria mundial que continua expandiéndose, principalmente gracias a la versatilidad de la reacción para controlar las propiedades del polímero formado. En estos últimos años las presiones medioambientales, particularmente dirigidas a la industria del polímero solvente para tintas y adhesivos, ha hecho que creciera el interés en las emulsiones. La diversidad de los campos de la polimerización en emulsión es evidente, a juzgar por el amplio espectro de aplicaciones hacia los que va dirigida que incluyen gomas sintéticas, pinturas, tintas, adhesivos, pulimentos para suelos, cementos selladores, etc.

Después del relativamente rápido desarrollo y comprensión de la polimerización en emulsión, que vino a través de los estudios realizados por la US Rubber Reserve Company en los años 40, se activó el desarrollo tecnológico en estos campos. Aunque un conocimiento más profundo y concreto de las emulsiones no tuvo lugar hasta finales de los 60 y principios de los 70.



---

## 2.2 EL MODELO HARKINS.

La polimerización en emulsión se basa en el fenómeno por el cual un tensoactivo o emulsificante (en la correcta concentración), puede dar lugar a agregados de él mismo llamados micelas. Estos agregados se formarán cuando se excede la Concentración Micelar Crítica, o CMC.

La concentración micelar crítica es aquella mínima concentración de tensoactivo a partir de la cual no disminuye la tensión superficial del líquido. Al añadir tensoactivo a una disolución, éste se agrupa en una fina capa en la barrera líquido-aire. Una vez se ha recubierto esta capa y al seguir incrementando su concentración va disminuyendo la tensión superficial hasta que se llega a la concentración micelar crítica. Estas micelas, son partículas que miden entre 0.001 y 0.3 micras, formadas por un agregado de moléculas semejantes y que constituyen un sistema coloidal, es decir, las partículas se encuentran suspendidas en un líquido mediante un equilibrio dinámico.

En el proceso de polimerización por emulsión, el monómero está suspendido en agua bajo la presencia de un emulsionante cuya concentración excede la CMC. Este monómero se presenta en forma de gotas estabilizadas por una fina capa de emulsionante, y en un menor grado, disueltas en la fase acuosa. Este modelo propone distinguir entre varias etapas:

### **Etapas I:**

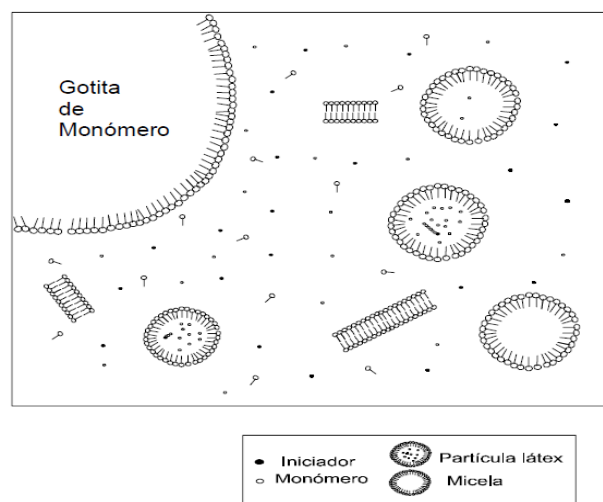
Al adicionar un iniciador soluble en agua que se disocia con la temperatura, los radicales libres se generan en la fase acuosa y paulatinamente difunden dentro de las micelas. Esto se debe a que el monómero es insoluble y se encuentra más cómodo en el medio creado por la micela. La rapidez de captación es proporcional a la superficie de cada una de ellas, ya que el tamaño individual de éstas es muy inferior al de las gotitas y su superficie específica mucho mayor.

En el momento que en la micela aparece un radical libre susceptible de reaccionar y formar un polímero, pasan a denominarse partículas de látex.

La cantidad de monómero que puede albergar cada partícula de látex viene determinada por razones termodinámicas. Por otra parte, al adsorber monómero la partícula aumenta de tamaño hasta alcanzar el equilibrio con la tensión superficial, se dice entonces que la partícula de látex ha alcanzado la concentración de saturación.

A medida que la polimerización progresa, el monómero contenido en las partículas se adiciona al polímero en crecimiento. Nuevas cantidades de monómero procedentes (por difusión) de la capa acuosa se incorporan a la partícula. La fase acuosa, a su vez, se mantiene también saturada de monómero por la presencia de las gotas que actúan como reserva. El monómero que difunde de la fase acuosa, es repuesto por las gotas de monómero, manteniendo así una concentración de monómero constante en el agua. (Figura 2.1)

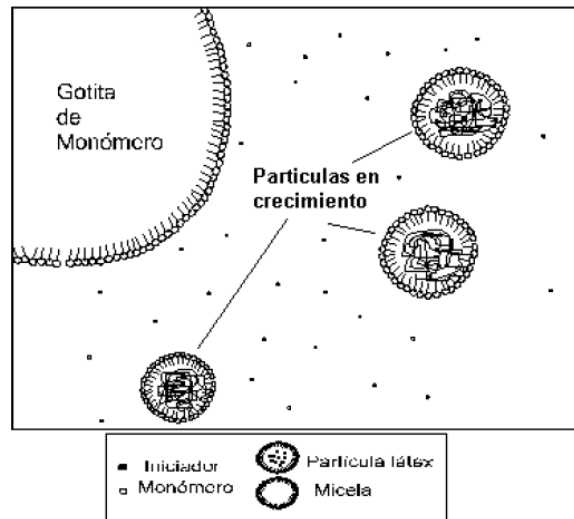
Las partículas de látex van creciendo de tamaño a medida que progresa la polimerización y absorben nuevo monómero. Para mantenerse estabilizadas, estas partículas necesitan cada vez una mayor cantidad de tensoactivo para recubrir su tamaño creciente. Estas moléculas de tensoactivo las obtienen a expensas de las micelas en las que aún no se ha iniciado la polimerización. Este efecto se va repitiendo hasta que finalmente la concentración de emulsificante se encuentra por debajo de la CMC.



**Fig.2.1** Representación etapa 1 del modelo Harkins

## Etapa II:

En esta fase las partículas crecen a expensas de las gotas de monómero, las cuales disminuirán en tamaño y cantidad. El monómero está continuamente difundiendo desde las gotas de monómero a través de la fase acuosa hacia las partículas. (Figura 2.2).



*Fig.2.2 Representación etapa 2 del modelo Harkins*

## Etapa III:

En esta etapa, todas las gotas de monómero han desaparecido y el sistema consiste en una dispersión de partículas de polímero incorporando monómero no reaccionado. La ausencia de gotas de monómero puede causar eventualmente que la concentración de monómero en el interior de la partícula decaiga, de manera que la reacción descenderá hasta finalizar.

La teoría de Harkins, se puede resumir en los siguientes puntos:

- Las gotas de monómero principalmente actúan como reservorio de monómero, de las cuales las moléculas de monómero difunden a través de la fase acuosa hacia las micelas o más tarde hacia las partículas de polímero-monómero formadas.
- La polimerización tiene lugar en dos sitios, en el inicio principalmente en las micelas (en las cuales una menor cantidad de monómero ha sido

---

solubilizado), y posteriormente en las partículas polímero-monómero como resultado de la polimerización de monómeros en las micelas.

- El inicio de la polimerización tiene lugar en la fase acuosa, pero rápidamente se traslada a las micelas y posteriormente a las partículas.

- El crecimiento de las partículas de monómero-polímero crea un aumento de la superficie de la misma, lo que conlleva a la adsorción del emulsionante de las micelas en las que todavía no se ha iniciado la polimerización.

- Las gotas de monómero desaparecen como resultado de la continua absorción de monómero por el crecimiento de las partículas de monómero-polímero. Esta fase solo en la polimerización se consigue una vez las micelas han desaparecido y el sistema solo contiene partículas hinchadas de polímero-monómero.

### **2.2.1 OBJECIONES A LA TEORÍA DE HARKINS.**

El modelo que se ha descrito anteriormente está constantemente referido a un sistema de polimerización en emulsión ideal, los monómeros son abrumadoramente insolubles en agua, mientras que el polímero formado puede estar mezclado con el monómero en alguna proporción.

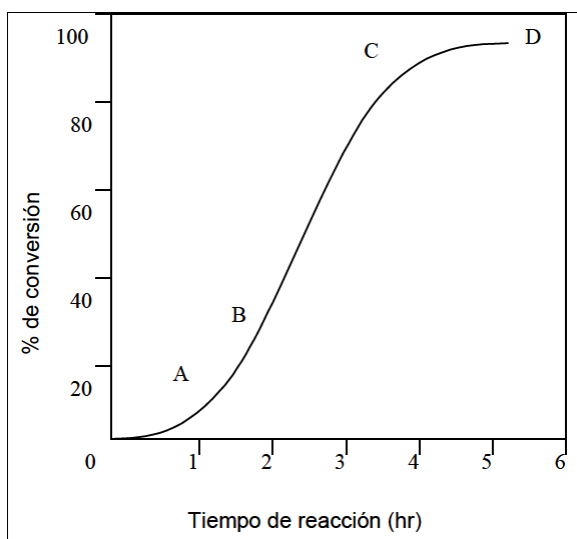
Sin embargo, cuando un monómero es razonablemente soluble en agua, la polimerización puede tener lugar en un grado considerable en la fase acuosa (sobre todo en el inicio de la reacción).

También puede suceder que el polímero sea insoluble en su propio monómero, como puede ser el caso del acrilonitrilo. Aunque la reacción pueda llevarse a cabo siguiendo las pautas de la teoría de Harkins, el polímero precipitará como una fase separada dentro de la partícula de polímero-monómero, mientras la polimerización tendrá lugar en la superficie en esas partículas en las cuales en el monómero será adsorbido.

La polimerización siempre tendrá lugar en las partículas de monómero-polímero si el monómero es parcialmente miscible con su polímero. Las micelas irán desapareciendo a medida que las partículas crecen, pero estas no son capaces de absorber gran cantidad de monómero. Por lo tanto, más monómero

permanecerá en forma de gotas. Debido al hecho que las partículas crecerán y se necesitará más emulsionante para estabilizarlas, las gotas de monómero se irán inestabilizando por lo que se unirán formando gotas más grandes. Como consecuencia, el total de la superficie de las mismas disminuirá y por lo tanto decrecerá la cantidad de monómero capaz de difundir en la fase acuosa. Esto reducirá el grado de polimerización.

Si se representa en una gráfica el % de conversión de la emulsión vs. el tiempo que ha transcurrido, se distinguirán varias regiones o fases (Figura 2.4). Inicialmente (fase A), donde la formación de polímero es bastante pobre; después incrementa gradualmente (fase A-B) para pasar a la fase linear B-C, hasta que finalmente el monómero queda totalmente agotado (fase C-D).



**Fig 2.3** Esquema típico de conversión vs. Tiempo de reacción de una polimerización en Emulsión.

### 2.3 EMULSIFICANTES.

Un emulsificante o tensoactivo es un material superficialmente activo, esto es, que varía la tensión superficial de un fluido en el que está disuelto. El emulsionante es un importante componente del sistema de polimerización en emulsión, con gran impacto en el desarrollo de la reacción, en la apariencia física

---

y en las propiedades finales del producto. Tiene triple función dentro de la polimerización:

- Actúa como estabilizador de las gotas de monómero.
- Actúa como suministrador de micelas.
- Actúa como estabilizador de las partículas de polímero.

### 2.3.1 CLASIFICACIÓN DE LOS EMULSIFICANTES.

Cada molécula de emulsificante se puede dividir en dos grandes partes:

- Hidrofílica (polares), que es soluble en agua.
- Hidrofóbica (apolares), no soluble en agua.

El grupo hidrofílico (polar), consiste en un ión (cabeza) o hidrocarbano funcionalmente hidrofílico.

El grupo hidrofóbico (apolar), consiste en una cadena de hidrocarbano apolar (cola) dentro de la molécula de emulsionante [Mohamed S. El-Aasser, 1997].

Hay varios tipos de emulsionantes:

- Emulsionantes no-iónicos: Su sección hidrofílica consiste en un hidrocarbano funcionalmente hidrofílico, pero sin carga alguna.
- Emulsionantes aniónicos: Su sección hidrofílica consiste en una carga negativa.
- Emulsionantes catiónicos: Su sección hidrofílica en una carga positiva.
- Emulsionantes anfóteros.

**Emulsionantes no-iónicos:** Estos emulsionantes, se utilizan en los sistemas de polimerización en emulsión en los que se busca conseguir un ancho rango de insensibilidad a las fluctuaciones de pH.

**Emulsionantes Aniónicos:** Los que utilizamos en la síntesis de este trabajo, y son a menudo sales que consisten en una parte hidrofóbica (parte alquil o aril) y otra hidrofílica. Generalmente tratamos con sulfatos y sulfanatos emulsionantes.

La ventaja de utilizar un emulsionante aniónico frente uno no-iónico, es que el primero es menos sensible a las fluctuaciones de temperatura. Como

---

inconveniente presentan elevada sensibilidad a las fluctuaciones de pH y a la concentración del electrolito.

### 2.3.2 ESTABILIZACIÓN DE LOS SISTEMAS COLOIDALES.

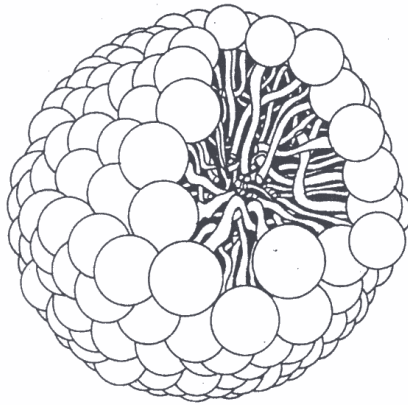
Para entender cómo trabaja la propiedad de estabilización de los emulsionantes, servirá de ayuda repasar cómo funcionan los mecanismos de estabilización de los sistemas coloidales. Evidentemente juegan un papel primordial dos tipos de fuerzas, estas son las de atracción las de repulsión.

- **Atracción:** La atracción entre las partículas coloidales es causada por las fuerzas de Van der Waals.
- **Repulsión:** Para prevenir la coagulación de las partículas creada por las fuerzas de Van der Waals, un mecanismo específico entra en juego para asegurar que las partículas permanecen a suficiente distancia una de la otra, estas son:
  - *Repulsión electroestática:* Llevada a cabo por la presencia de grupos en la superficie de la partícula, de manera que se repelen unas de las otras. Estos grupos pueden provenir del iniciador (como es el caso de los persulfatos:  $-\text{SO}_4^-$ ) o de los monómeros que contengan grupos funcionales (ácido acrílico o metacrílico:  $-\text{COO}^-$ ) y por otro lado, de emulsionantes aniónicos adsorbidos en la propia superficie del polímero. En ambos casos una doble capa se forma alrededor de cada partícula, de manera que repelerán cada una de las otras partículas, previniendo la coagulación.
  - *Estabilización estérica:* Cuando los emulsionantes no-iónicos son adsorbidos sobre la superficie de la partícula de polímero, generalmente el grupo hidrofóbico es el que se mantiene pegado a la partícula, mientras que la parte hidrofílica se mantiene en contacto con las moléculas de agua.

---

### 2.3.3 FORMADOR DE MICELAS.

Un tensoactivo en agua forma unos agregados coloidales, son las llamadas micelas. Estas estructuras consisten en agregados de unas 50-100 moléculas de emulsionante, con un diámetro total de aproximadamente 0,1 a 0,3  $\mu$  ( $1\mu = 10^{-6}$  m) según se esquematiza en la figura 2.4. La parte soluble en agua (hidrofílica) está direccionada hacia la fase exterior acuosa, en cambio la parte no soluble (hidrofóbica) está dirigida hacia el corazón de la micela.

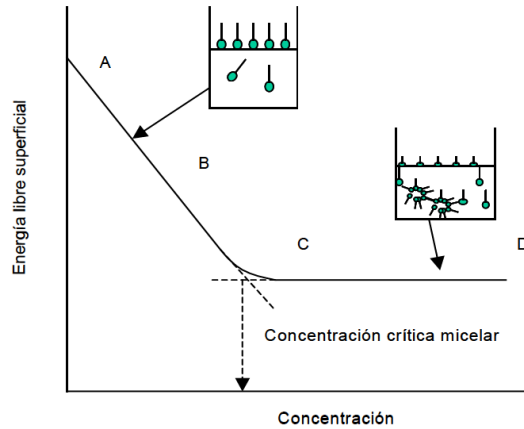


*Fig. 2.4 Representación de una micela esférica*

La figura 2.5 muestra la variación de la tensión superficial ( $\gamma$ ) del sistema en función de la concentración de emulsionante añadido gota a gota en agua. Podremos diferenciar varias etapas.

Al principio las moléculas de emulsionante principalmente se concentran en la interfase entre el agua y el aire (zona A-B), esto causa que la tensión superficial entre ambos decrezca. Una vez esa interfase se ha cubierto completamente y más tensoactivo es adicionado a la solución, las moléculas de emulsionante empiezan a formar micelas (zona C-D).





**Fig 2.5** Variación de tensión superficial vs. Concentración de tensoactivo

## 2.4 VARIABLES EN EL PROCESO DE EMULSIÓN

A parte del tipo de primera materia y de su calidad, también juegan un papel muy importante las diferentes variables de proceso que se tiene que controlar. En esta sección se discutirá el efecto de las siguientes variables:

- Temperatura
- pH
- Agitación
- Dosificación de la cantidad de monómeros

### 2.4.1 TEMPERATURA.

Una reacción en emulsión puede ser iniciada a bajas temperaturas (30 – 40°C) caso de las reacciones oxido-reducción o a elevadas temperaturas(60 – 90 °C), como es el caso de la polimerización semicontinua. Generalmente el intervalo de temperaturas en los que se inicia la alimentación por el procedimiento semicontinuo (o de alimentación) es de 70° a 90 °C aproximadamente.

Un incremento en la temperatura fuera de los rangos preestablecidos puede tener diferentes efectos secundarios; aumento de la rapidez de reacción, lo que causará a su vez un incremento del número de partículas. La eficacia del emulsionante a esa temperatura se verá comprometida, ya que se crearán demasiados centros crecientes para la cantidad de emulsionante que contiene el reactor, aceleración de la formación de radicales, y por lo tanto, aumento de su concentración. Como resultado más partículas pueden ser formadas en la etapa

---

de iniciación, disminuyendo la media del grado de polimerización reducida (muchas cadenas en crecimiento pero más cortas).

#### **2.4.2 pH.**

Varios puntos a tener en cuenta del control del pH del medio reactor dependerá la estabilidad de la emulsión. Si el pH es demasiado bajo ciertos emulsificantes se pueden hidrolizar, lo que conllevará a una desestabilización del sistema. En este caso, los emulsionantes no iónicos son menos susceptibles a este efecto que los aniónicos (como ya se había apuntado).

Tiene efecto directo sobre la viscosidad. Si neutralizamos una emulsión que contiene grupos ácidos en su interior, veremos cómo se forman partículas de gel. El cambio de pH ha facilitado la desestabilización de las partículas liberando al exterior el polímero formado.

El pH también puede afectar a la eficacia del sistema iniciador. Los persulfatos, por ejemplo, son disociados mediante una reacción autocatalítica debida a la formación de iones hidrógeno (bajo pH), de la misma manera el sistema redox formado por persulfato y sulfato de bisulfito de hierro (II) actúan mucho mejor a pH bajos (lo que se consigue con una acidificación previa del reactor). Finalmente, se ha comprobado experimentalmente que el pH afecta a la copolimerización de los monómeros solubles en agua. Por ejemplo, ácidos como el ácido Acrílico o el Metacrílico experimentan una mayor copolimerización si el medio acuoso tiene un pH bajo.

#### **2.4.3 AGITACIÓN.**

La agitación tiene un peso específico elevado en el proceso de una reacción de polimerización en emulsión, se debe conseguir un buen movimiento del sistema del reactor si se desea conseguir que los monómeros se distribuyan de forma homogénea a través del medio como pequeñas gotitas. Si un tensoactivo no puede ser disuelto apropiadamente y distribuido a través del medio en el que se

---

encuentra, su eficacia se verá seriamente comprometida. Síntoma de esa insuficiente agitación es la aparición de gran cantidad de sedimentos.

Por otro lado, una excesiva agitación puede comprometer la estabilidad de las partículas, causando coagulación y sedimentación. El tipo y rapidez de agitación dependerá de la técnica de proceso utilizada. Si la resina es de tipo redox, la agitación inicial será baja para evitar la incorporación de oxígeno en la mezcla.

En la polimerización de tipo semi-continua (donde la viscosidad del medio aumenta a medida que se va progresa el grado de polimerización), se tiene que asegurar que los monómeros alimentados son mezclados apropiadamente en el medio reactor. Puede darse el caso que se consiga la disolución parcial del polímero formado en el monómero presente, como consecuencia de una excesiva agitación. Se podrá observar un aumento del porcentaje de sedimentos.

La formación de espumas por una elevada agitación, puede dar a la larga problemas de sedimentación y filtrado.

En aquellos procesos en los que se adicione primeras materias una vez la reacción de polimerización ya se ha llevado a cabo (caso de antiespumantes, plastificantes, biocidas), una correcta agitación será crucial si se quiere evitar gelificación, sedimentos y/o coagulación. Finalmente hay emulsiones que presentan mayor sensibilidad a los efectos de la agitación que otras, debido a su naturaleza y constitución.

#### **2.4.4 RAPIDEZ DE DOSIFICACIÓN DEL MONÓMERO.**

En las emulsiones de tipo semi-continuo, el reactor contiene una baja concentración de polímero en el inicio de la alimentación. En ese punto del proceso se ha transferido previamente la semilla desde el tanque de alimentación al reactor, y se ha hecho reaccionar convenientemente de manera que los sólidos que presentan son aproximadamente del 10-15%. Bajo estas circunstancias, el contenido del reactor tendrá una baja viscosidad, es entonces cuando la

---

transferencia de calor a la pared del reactor es mayor. Cuanto más monómero es dosificado desde el tanque de alimentación, el contenido en sólidos irá aumentando gradualmente hasta acercarse al contenido de sólidos teórico. Una vez se haya transferido todo el monómero al reactor, el contenido de monómero libre descenderá hasta niveles de 500 mg/l o menos.

### 3 MODELO EXPERIMENTAL

#### 3.1 Diseño Experimental

Se busca estudiar los efectos en el desempeño como estabilizante de suelo el cambio de la variación de concentración de emulsificante, la proporción de Acetato de Vinilo y Acrilato de Butilo y la adición de agente carboxilante, que en este caso se utilizó Ácido Metacrílico.

El experimento consiste en llevar a cabo varias reacciones de copolimerización en emulsión modificando la concentración de emulsificante y proporción de monómeros a temperatura constante (60° C) en atmósfera inerte, en un reactor semi-Continuo (entrada simultanea de monómero, emulsificante y solución de iniciador) de vidrio con capacidad de 1L, de tipo tanque agitado. Seguir la cinética de la reacción, caracterizar el producto final y hacer pruebas de compresión con probetas de mezclas tierra – látex.

Se empleó un diseño de experimentos de dos variables con tres niveles, más 3 experimentos adicionales, resultado de la caracterización de los primeros 9 lotes. A continuación se muestra la tabla del diseño de experimento junto con las variables a modificar.

	VAM/BA	Surfactol EL30	Disponil FES993
K1	60/40	2.3 phm	1.1 phm
K3	65/35	2.3 phm	1.1 phm
K2	70/30	2.3 phm	1.1 phm
L1	60/40	1.15 phm	0.55 phm
L3	65/35	1.15 phm	0.55 phm
L2	70/30	1.15 phm	0.55 phm
M1	60/40	0.56 phm	0.27 phm
M3	65/35	0.56 phm	0.27 phm
M2	70/30	0.56 phm	0.27 phm
K3.1	65/35; 0 phm MAA	2.3 phm	1.1 phm
K3.2	65/35; adición MAA	2.3 phm	1.1 phm
K3.3	65/35; adición MAA/BA	2.3 phm	1.1 phm

**Tabla 3.1** Diseño experimental 2 variables 3 niveles, más 3 pruebas exploratorias.

---

Cabe mencionar que las variaciones de cantidad de emulsificante que se presentan en la tabla 3.1 sólo se presentan en la parte de la semilla de la reacción, esto con el propósito de modificar la cantidad y el tamaño de las partículas a nuclearse en dicha etapa, siempre y cuando se siga una nucleación micelar. Por otra parte, la preemulsión sólo contiene tensoactivo no iónico con un contenido de 1.7 phm para todos los lotes realizados en el presente trabajo.

Para tener un mejor control sobre la cinética de polimerización y facilitar los cálculos al momento de elaborar las probetas, todos los látex están formulados para contener un 30% en sólidos y una masa total del producto de 500g, la cual es suficiente para las pruebas de compresión, caracterización de látex y para un fácil almacenamiento y manejo del producto.

Adicionalmente los experimentos K3.1 y K3.2 muestran el efecto en el desempeño del material al no adicionar MAA (K3.1) y adicionar súbitamente 90% de MAA en la preemulsión (K3.2).

Por último el lote K3.3, con base a los resultados de caracterización de látex y pruebas de compresión, es modificado en su formulación tratando de maximizar su desempeño como estabilizante de suelo con respecto a los látex anteriormente producidos.

### **3.2 Equipo y Reactivos.**

Para el proceso semi-continuo de polimerización en emulsión, se emplearon los siguientes equipos y reactivos:

- Un reactor enchaquetado de vidrio, tapa de 5 bocas y válvula de descarga, tapones de vidrio y adaptador para agitador metálico.
- Motovariador eléctrico de 110V con regulador de velocidad y agitador de acero inoxidable con 2 propelas de 45° y una adicional de “media luna” en la parte inferior.
- Embudo de dosificación de 500 mL y agitador para preemulsión.

- 
- Baño de calentamiento con recirculación y mangueras para flujo de agua, registrador e indicador de temperatura digital y bomba de pistón para dosificación de preemulsión.
  - Bomba para Jeringa Terumo y "tubing" para dosificación de solución de iniciador.
  - Termo balanza @ 160°C para determinación de %NV
  - Acetato de Vinilo, Acrilato de Butilo y como monómeros principales y Ácido Metacrílico como agente carboxilante.
  - Agua Deionizada como medio de dispersión.
  - Surfapcol EL30 como emulsificante no iónico y Disponil FES993 como emulsificante iónico para co-estabilizar la emulsión.
  - Persulfato de Potasio (KPS) como iniciador de la reacción de polimerización e hidrosulfito AWC como par Redox para el agotamiento Químico de monómero residual.

### **3.3 Condiciones Experimentales.**

La polimerización se llevó a cabo en un Proceso Semi-Continuo, alimentando a la carga inicial de agua y tensoactivo el 10% de una preemulsión, la cual se dosifica 60 minutos después de iniciada la reacción. El proceso presenta 4 etapas durante la reacción de polimerización: etapa de semilleo in situ, dosificación de preemulsión, agotamiento térmico y enfriamiento de la mezcla de reacción junto con agotamiento químico. Dicho proceso se ejecuta a una temperatura de reacción de alrededor de 60°C, con una velocidad de agitación de ~120 rpm para tener un buen mezclado de los reactivos y evitar floculaciones debido a choques entre partículas debido a una alta agitación.

El tiempo de dosificación fue uno sólo para todos los experimentos, cuyo tiempo es de 2.5 horas, más una hora previa para el semilleo y una hora de agotamiento térmico a una temperatura de 65°C.

---

### 3.4 Procedimiento.

**Preparación de Preemulsión:** pesar la cantidad de agua en un vaso adecuado al volumen total de la preemulsión, pesar el tensoactivo no iónico y disolverlo con un poco de agua previamente pesada. Pesar por separado los monómeros y mezclarlos en un vaso de tamaño adecuado, adicionar dicha mezcla de monómeros lentamente a la solución de agua y tensoactivo, manteniendo una agitación vigorosa en todo momento.

**Carga inicial del reactor:** Pesar el agua en un vaso de tamaño adecuado al volumen total de carga inicial. Pesar los tensoactivos en un vaso y disolverlos con un poco de agua de la carga inicial. Agregar lentamente el 10% de la preemulsión antes preparada, cargar al reactor la mezcla y comenzar calentamiento fijando el setpoint 5°C superior a la temperatura de proceso.

**Preparación de solución de iniciador:** Disolver iniciador persulfato de potasio en agua con las cantidades previamente calculadas, cargar la solución en una jeringa y colocar otra en una bomba dosificadora.

**Arranque de la polimerización.** Encender la agitación y fijar la velocidad en el valor establecido, abrir llave de nitrógeno para purgar aire del reactor mientras se calienta la carga inicial. Al llegar a 60°C inyectar la solución de iniciador y comenzar cronómetro de la reacción, polimerizar en lote por tiempo de una hora.

**Dosificación:** Al terminar el semilleo, iniciar la dosificación del resto de la preemulsión y la solución de iniciador a flujo constante durante el tiempo indicado, manteniendo una temperatura, flujo y agitación constante. Tomar lecturas de %NV al inicio y al final de la dosificación, así como también cada media hora durante la duración de la dosificación.

**Agotamiento:** Al terminar la dosificación mantener la temperatura @  $65 \pm 1^\circ\text{C}$  y agotar por 60 minutos. Enfriar el reactor a 40°C y agregar el Hidrosulfito AWC para agotamiento químico; finalmente enfriar a 30°C, descargar y cuantificar las mermas del proceso: incrustación y/o grumo generado.





Fig 3.1 Esquema de reacción en emulsión en reactor semi-continuo.

**FORMULACIÓN**

Componente		% peso	phm	W teórico (g)	W real (g)
<b>Preemulsión</b>					
Agua	A	35.00	77.7778	175.00	
Surfactol EL30	B	0.533	1.1844	2.67	
Acrilato de Butilo	D	17.82	39.6	89.11	
Acetato de vinilo	E	26.73	59.4	133.66	
Acido metha-acrílico	F	0.45	1.0	2.23	
Agua de enjuague	G	0.50	1.1111	2.50	
<b>Carga Inicial</b>					
Agua	H	15.83	35.1711	79.14	
Surfactol EL30	I	0.667	1.4822	3.34	
Disponil FES 993	J	0.333	0.7400	1.67	
<b>Solución de iniciador para carga inicial</b>					
Persulfato de Potasio	K	0.07	0.1556	0.35	
Agua	L	1.00	2.2222	5.00	
<b>Solución de iniciador para dosificación</b>					
Persulfato de Potasio	K	0.07	0.1556	0.35	
Agua	L	1.00	2.2222	5.00	
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>500.00</b>	

**Condiciones de reacción:**

Tipo de proceso:	<u>Semi-continuo</u>	Tiempo de semilleo:	<u>60 min</u>
Temperatura de reacción:	<u>60°C</u>	Tiempo de dosificación:	<u>150 min</u>
Temperatura de agotamiento:	<u>60°C</u>	Tiempo de Agotamiento :	<u>60 min</u>
Reactor:	<u>1L</u>	Vinicial de agitación:	<u>150 rpm</u>

Fig 3.2 Hoja de formulación de un lote de látex con registro de datos experimentales

---

### 3.5 Avance de reacción por gravimetría.

La determinación de la cinética de reacción del proceso de polimerización, se siguió por medio de gravimetría. La gravimetría consiste en el seguimiento de la cantidad o porcentaje de sólidos o compuestos no volátiles durante el proceso de polimerización. Dicho seguimiento consiste en la extracción de una pequeña muestra la cual se coloca en una charola de aluminio, de preferencia, para su secado a una temperatura de 160°C, si es el caso de una termobalanza o de 120°C en estufa por tiempo de 2 horas, con previa adición de hidroquinona con el fin de detener el avance de reacción.

El porcentaje de sólidos corresponde a los compuestos no volátiles entre ellos el emulsificante, el iniciador y el polímero formado en determinado tiempo de la reacción entre el total de componentes en gramos, que forman la emulsión, como se muestra a continuación.

$$\%NV = \frac{E+I+\chi M}{E+I+W+M} \quad \dots\dots\dots Ec. 3.1$$

Despejando la conversión de la ecuación 1:

$$\chi = \frac{\%NV*(E+I+W+M)-(E+I)}{M} \quad \dots\dots\dots Ec 3.2$$

Sustituyendo los valores en la Ecuación, se obtienen los valores de conversión a cada instante del proceso de polimerización. Para determinar los sólidos obtenidos a cada instante de la reacción, simplemente hay que dividir la masa seca entre la masa de la muestra añadida como se muestra a continuación.

$$\%NV = \frac{M_S - M_{ch}}{M_H - M_{ch}} \quad \dots\dots\dots Ec. 3.3$$

---

### 3.6 Pruebas de Compresión.

Una vez sintetizados los látex, se procede a elaborar probetas cilíndricas de 2 x 2 pulgadas aproximadamente, con mezclas de tierra-látex al 1, 3 y 6% en peso de cada látex sintetizado.

La metodología empleada para la elaboración de las probetas corresponde a lo siguiente: Se deja secar previamente la arena volcánica en estufa @ 60°C por un periodo mínimo de dos semanas, una vez seca la arena se toman como base 160g de masa total (polímero + arena seca), para realizar el cálculo de la cantidad de látex a añadir. Para facilitar el cálculo, se produjeron látex con un 30% en masa de no volátiles, es decir, el 30% de cada producto es polímero en suspensión coloidal perfectamente estable; lo cual se comprueba por gravimetría una vez terminado el látex.

Una vez comprobado el porcentaje de no volátiles por medio de gravimetría, se procede a hacer el cálculo de los pesos de tierra y de látex, como se muestran a continuación:

Al 1%: Se multiplican los 160 gramos totales de la probeta por el porcentaje de polímero a añadir:

$$160g * 0.01 = 1.6g \quad \dots\dots\dots Ec.3.4$$

Que corresponden a los gramos de polímero contenidos en la mezcla para la elaboración de la probeta, una vez conocido dicha masa de polímero, ésta se divide entre el porcentaje de no volátiles para conocer la cantidad de latex a adicionar a la probeta:

$$\frac{1.6g}{0.30} = 5.3g \quad \dots\dots\dots Ec. 3.5$$

Finalmente, para conocer la cantidad de arena para la mezcla, de la masa total que contiene la probeta, se le resta la cantidad de polímero a adicionar:

$$160g - 1.6g = 158.4g \quad \dots\dots\dots Ec. 3.6$$

---

Una vez realizados los cálculos para cada probeta, se procede a elaborar la mezcla en un recipiente adecuado al volumen de la misma. Después se coloca en un recipiente cilíndrico, el cual tendrá la función de molde y asegurar su forma hasta el secado de la probeta. Cabe mencionar que el secado se llevará a cabo a temperatura ambiente por un periodo mínimo de secado de 15 días.

Al término de ese tiempo se comprueba el completo secado de cada probeta elaborada, además que no contenga algunas imperfecciones que puedan alterar la medición de compresión. Ya secas las probetas se someten a la prueba de compresión. La prueba de compresión se llevó a cabo en el Laboratorio de Arenas de Fundición del Departamento de Ingeniería Química Metalúrgica en una máquina universal de esfuerzo para arenas, marca “Dietert Detroit”.



**Fig.3.3** *Compresión de una probeta tierra-latex con la máquina de esfuerzo para arenas.*

Esta máquina es empleada para evaluar la compresión en arenas de fundición, así como también se emplea para evaluar la resistencia a la tensión. La máquina presenta un motor que aplica una carga muerta mediante un péndulo, aplicando cargas uniformes en rangos extendidos pero que varían dependiendo del tipo de arena.

---

Al inicio del experimento el péndulo aplica una carga a una velocidad de carga aparentemente constante, posteriormente, conforme se le dificulta comprimir, aumenta la carga y disminuye la velocidad; por lo que a lo largo de la prueba no se aplica una velocidad constante ni una carga constante.

Cabe mencionar que dicha máquina detiene el trabajo que se esté realizando en ese instante cuando detecta un cambio sensible en la estructura de la probeta, es decir al haber una fractura interna o externa de la muestra la máquina detiene la compresión; por lo que al tener un material elastomérico, la máquina de esfuerzo podrá confundir éste con una fragmentación de la probeta. Por lo anterior es que no se espera una ruptura completa de la probeta, pero si nos dá una estimación de las presiones soportadas por el material.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Caracterización de la tierra

Se trata de una arena volcánica tomada del área de las faldas del Ajusco del volcán Xitle, se seleccionó este tipo de suelo puesto que se observó un alto contenido en finos. Se tomaron muestras aleatoriamente de diferentes lugares y se mezcló bien. Se realizó previamente un análisis de fracción hueca, con la finalidad de conocer el volumen disponible en los poros existentes entre las partículas de la tierra.

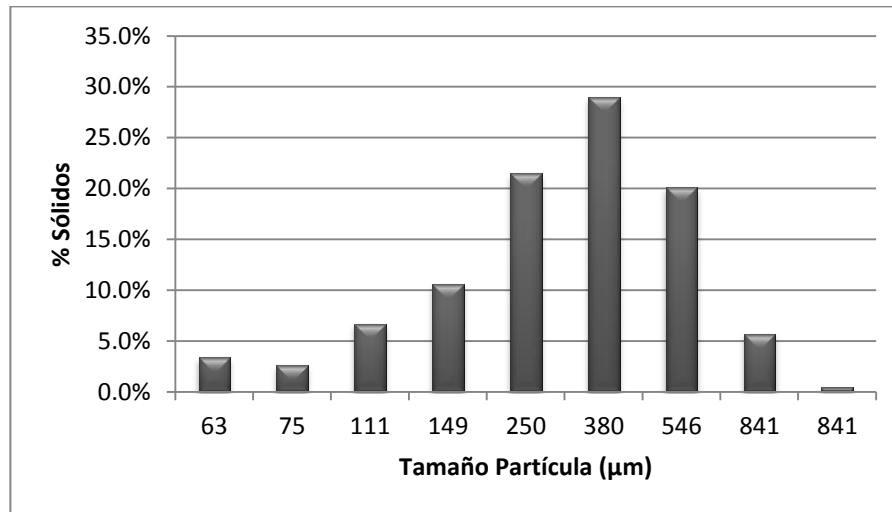
Para la prueba de fracción hueca se inició calculando la densidad de bulbo de la tierra, esto se hizo pesándose una probeta con 100 mL de tierra y se obtuvo una densidad de 1.4305 g/mL.

Posteriormente se agregó agua hasta que la tierra en la probeta estuviera totalmente húmeda y antes de que esta se inundara, por diferencia de peso y con la densidad, se obtuvo una fracción hueca en volumen del 39 %.

Malla	Escala de tamaño de criba ( $\mu\text{m}$ )	Apertura Nominal ( $\mu\text{m}$ )	Fracciones en la criba		Acumulativo de finos (%)	Acumulativo de gruesos (%)
			Peso (g)	% peso		
	841	841	0.5	0.5	100	0.5
20	-295	841	5.7	5.69	99.5	6.19
30	-166	546	20.1	20.08	93.81	26.27
40	-130	380	29	28.97	73.73	55.24
60	-101	250	21.5	21.48	44.76	76.72
100	-38	149	10.6	10.59	23.28	87.31
140	-36	111	6.7	6.69	12.69	94.01
200	-12	75	2.6	2.6	5.99	96.6
230	-63	63	3.4	3.4	3.4	100

**Tabla 4.1.** Caracterización del suelo (ASTM D-6913).

Así como también se efectuó un tamizado para conocer la distribución de tamaño de partícula de acuerdo a la norma ASTM–D6913. Se tamizaron 100 g de arena volcánica alrededor de 30 min en el tamizador eléctrico RoTap rx-29 del laboratorio de fundición de arenas (tabla 3.1 y gráfico 3.1).



**Gráfico 4.1.** Distribución de tamaño de partícula del suelo en estudio.

De acuerdo a la clasificación de suelos de la norma ASTM D-3282 y o el sistema unificado de clasificación de suelos, el tipo de arena empleada está dentro de la clasificación de arena fina, mal graduada o arena con grava y pocos finos (SP).

#### 4.2 Caracterización de los tensoactivos y cálculo de la CMC.

Para este caso se estudiaron 2 tipos de surfactantes comerciales para la elaboración de un polímero en emulsión; Un surfactante iónico (**Disponil® FES993**) que es un alcohol laúrico con 12 moles de óxido de etileno unido a un sulfato de sodio que le confiere el carácter iónico; el otro surfactante no iónico (**Surfacpol® EL30**) es un alcohol laúrico con 30 moles de óxido de etileno.

Se utilizó 2 métodos para determinar la CMC de los surfactantes antes mencionados.

- Cálculo de la tensión superficial mediante el anillo de Du Noüy
- Determinación de la conductividad eléctrica en una solución.

Para la parte experimental se prepararon previamente 6 disoluciones de cada tensoactivo a diferentes concentraciones, las cuales se emplearon en ambos métodos. A continuación se muestran los resultados de tensión superficial y conductividad para los 2 surfactantes.

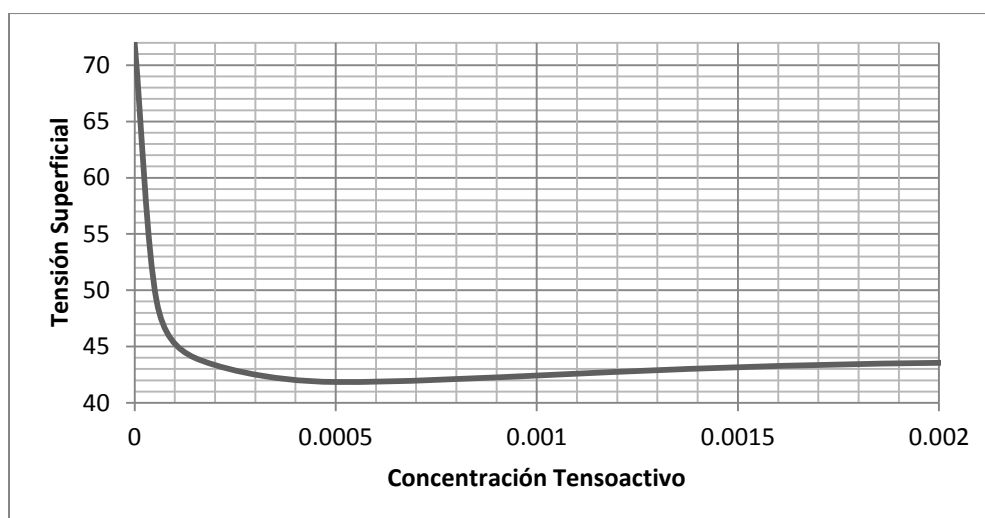
#### 4.2.1 Tensión Superficial de los surfactantes mediante el anillo de Du Noüy.

La medición de la tensión superficial de las disoluciones se llevó a cabo en el laboratorio 4-E del edificio "A" de la Facultad de Química, con el apoyo del equipo **KRUSS Processor Tensiometer K12**, el cual está provisto de un anillo de Platino-Iridio, una balanza analítica, y una interfaz que muestra el valor directo de la tensión superficial para cada medición.

Se procede a determinar en primer lugar la tensión superficial del surfactante no iónico, empezando por la solución más diluida y finalizando, en orden creciente, con la solución más concentrada de surfactante, la temperatura a la cual se realizaron las mediciones fue de 20°C.

SURFACPOL EL 30	
Conc. mol/L	$\Gamma$ (din/cm <sup>2</sup> )
0	71.98
0.0001	48.97
0.0002	43.99
0.0005	41.85
0.0020	43.55
0.0050	43.57
0.0100	44.25

**Tabla 4.2** Datos de tensión superficial de tensoactivo Surfapcol EL30



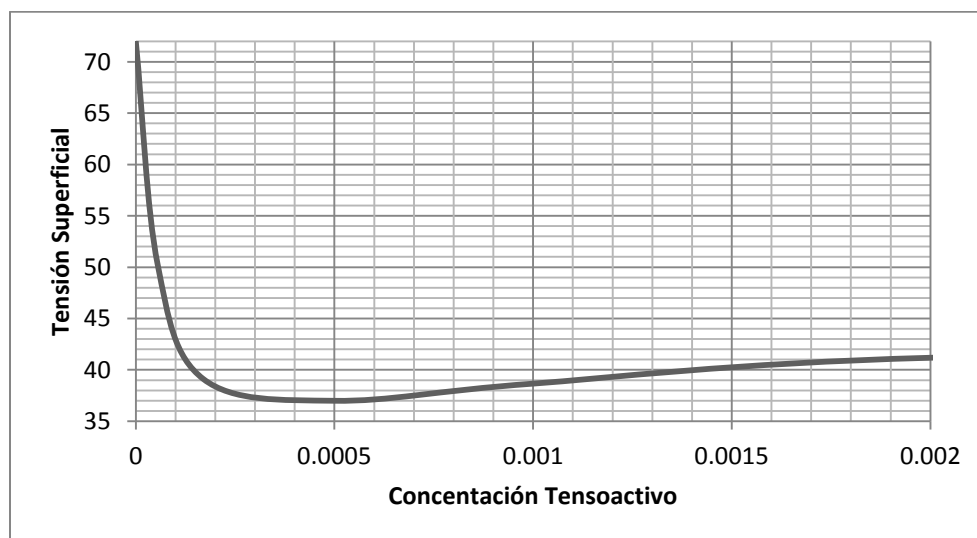
**Gráfico 4.2** Concentración Tensoactivo vs. Tensión superficial.



Para el caso del Disponil FES993, el tensiómetro arrojó los siguientes datos de tensión superficial:

Disponil FES993	
Conc. mol/L	$\Gamma$ (din/cm <sup>2</sup> )
0	71.99
0.0001	50.25
0.0002	39.11
0.0005	36.99
0.0010	38.66
0.0020	41.18
0.0050	42.86
0.0100	42.88

**Tabla 4.3** .Datos de tensión superficial de tensoactivo iónico Disponil FES993®



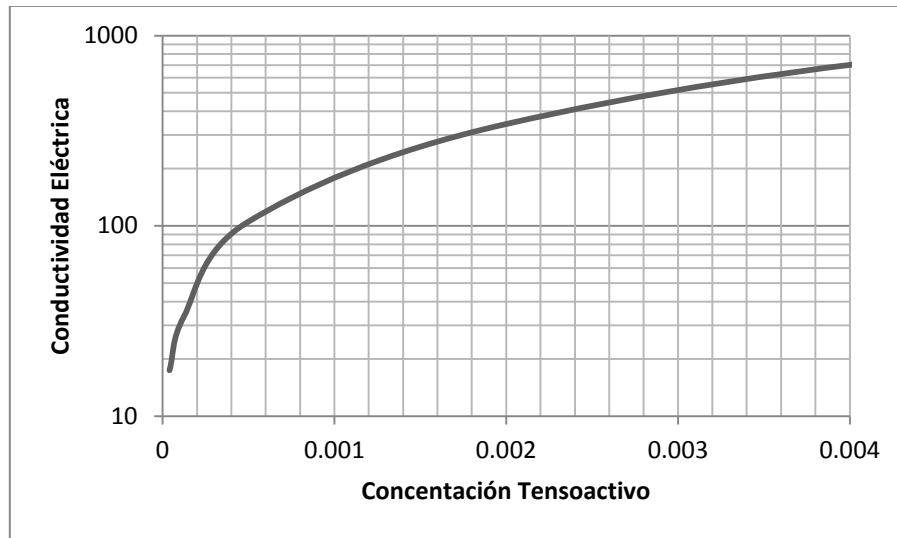
**Gráfico 4.3** Concentración tensoactivo vs. Tensión Superficial

#### 4.2.2. Cálculo de CMC mediante conductividad eléctrica.

Para realizar este experimento, se utilizó un conductímetro digital y las mismas soluciones de tensoactivo utilizadas en la primera parte. De igual forma se inicia midiendo la conductividad de la solución más diluida, hasta llegar a la más concentrada. Los resultados se presentan a continuación para ambos tensoactivos, en unidades de concentración (mol/L) vs. Conductividad eléctrica ( $\mu$ S).

Disponil FES993	
Conc. mol/L	$\mu\text{S}$
0.00005	17.41
0.0001	33.5
0.0005	105.3
0.002	343
0.005	879
0.01	1599

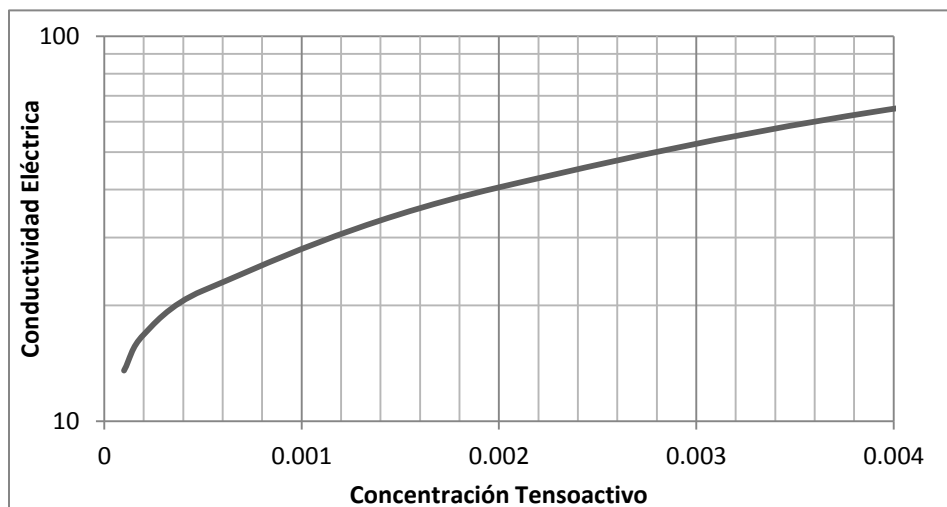
**Tabla 4.4** Datos de conductividad eléctrica y Gráfico de tensoactivo Disponil FES993



**Gráfico 4.4** Datos de conductividad eléctrica vs. Concentración tensoactivo Disponil FES993

Surfacpol	
Conc. mol/L	$\mu\text{S}$
0.0001	13.54
0.0002	16.79
0.0005	21.84
0.002	40.5
0.005	75.4
0.01	109.8

**Tabla 4.5** Datos de conductividad eléctrica y concentración tensoactivo Surfacpol EL30



**Gráfico 4.5** Conductividad eléctrica vs. Concentración tensoactivo Surfapcol EL30

Como se observa en el gráfico 4.4 el tensoactivo iónico presenta una mayor conductividad eléctrica en solución con respecto al no iónico, aparte q presenta un cambio de pendiente más claro en su gráfico, lo que quiere decir que la CMC puede verse con mayor claridad q en el método anterior y tiene un valor de  $4 \times 10^{-4}$  mol/L. Por otra parte la Figura 4 que representa la conductividad del surfactante no iónico, presenta una línea más continua y es más difícil hacer una buena lectura de la CMC, pero haciendo una aproximación detallada, dicha CMC se encuentra entre  $1.4 \times 10^{-4}$  y  $1.6 \times 10^{-4}$  mol/L.

En conclusión se puede deducir que, en cuestión de métodos, el anillo de Du Noüy es más versátil con el cálculo de tensión superficial al poder medir varios tipos de tensoactivo, pero no es tan exacto al momento de requerir una buena lectura de la CMC de algún tensoactivo. Por otra parte el método de conductividad eléctrica de tensoactivo en solución resulta muy eficaz sólo para un tipo de surfactante iónico. De lo anterior se concluyen las CMC aproximada de los tensoactivos las cuales son:

<b>TENSOACTIVO</b>	<b>CMC</b>
<b>Surfapcol EL30</b> (tensoactivo no iónico)	$1.4 \times 10^{-4}$ mol /L
<b>Disponil FES993</b> (tensoactivo iónico)	$1.6 \times 10^{-4}$ mol/L

**Tabla 4.6** Concentración Micelar Crítica de ambos tensoactivos

Con base a los resultados del cálculo de CMC para ambos tensoactivos, se determina el número de veces por arriba de la CMC con la que se sintetizaron los látex en los 3 diferentes niveles. Cabe mencionar que solo se modificó la cantidad de emulsificante en la semilla y se mantuvo en la parte de la preemulsión.

A continuación se presenta una tabla con los el número de veces la CMC en los lotes sintetizados.

Lotes	Semilla		Preemulsión
	Surfacpol EL 30	Disponil FES 993	Surfacpol EL 30
K1,K2,K3	103	10	75
L1,L2,L3	51	5	75
M1,M2,M3	25.6	2.5	75

*Tabla 4.7 Número de veces CMC en los diferentes lotes producidos*

### 4.3 Caracterización de Látex.

De acuerdo con el título del presente trabajo, se caracterizó el látex de acuerdo con las variables que pueden ser afectadas modificando la cantidad de emulsificante en la semilla, la relación de monómeros utilizados y la adición del carboxilante (ácido Metacrílico). Dichas caracterizaciones corresponden a la cinética de la reacción, determinación de la temperatura de transición vítrea, tamaño de partícula, pH del producto y peso molecular.

#### 4.3.1 Cinética de reacción.

Como ya se mencionó previamente, el seguimiento del avance de la reacción de polimerización se determinó por medio de la gravimetría. En todos los lotes producidos se espera una conversión global o total mayor al 99%; lo anterior debido a que existen trazas de monómero residuales, especialmente de Acetato de Vinilo, el cual tiene una solubilidad considerable en el agua. Por consiguiente el porcentaje de sólidos totales puede ser igual o menor al 30%.

Para agotar la mayoría de monómero residual existente en la emulsión, se coloca una pequeña cantidad de Hidrosulfito de Sodio que junto con el persulfato residual, dar lugar a una reacción Redox, la cual genera una cantidad considerable de radicales libres.

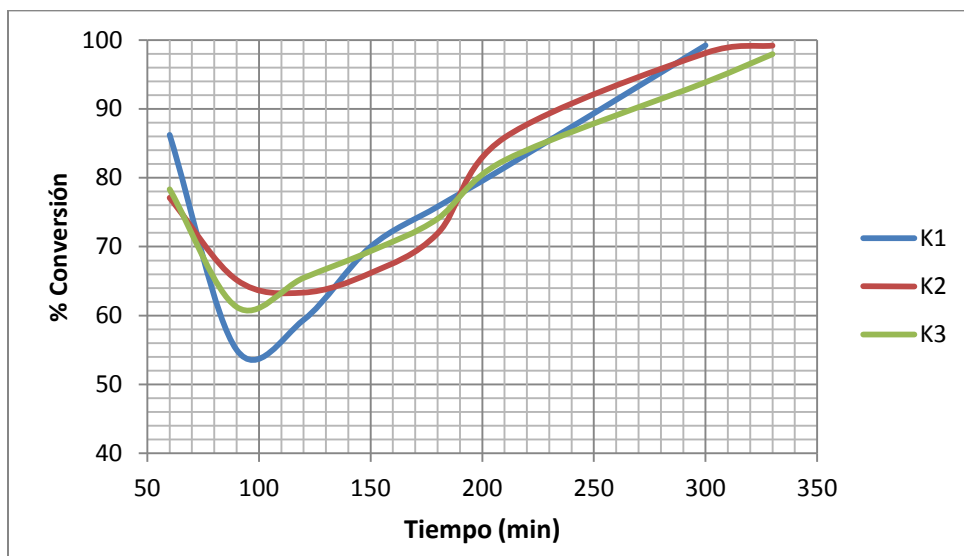
A continuación se muestra una tabla con las conversiones globales y el porcentaje de sólidos para cada lote de látex sintetizado. También se muestra la gráfica de la cinética de reacción de los diferentes lotes.

<b>Lote</b>	<b>% Sólidos</b>	<b>Conversión Final</b>
<b>K1</b>	30.09	99.21%
<b>K2</b>	29.96	99.05%
<b>K3</b>	29.53	97.64%
<b>L1</b>	29.53	98.59%
<b>L2</b>	28.12	93.28%
<b>L3</b>	30.05	99.57%
<b>M1</b>	29.85	99.12%
<b>M2</b>	30.22	99.70%
<b>M3</b>	30.05	99.21%
<b>K3 SMAA</b>	29.91	99.72%
<b>K3 0/100</b>	30.19	99.37%
<b>K3 BA+MAA</b>	30.25	99.10%

**Tabla 4.8** Conversiones globales y porcentaje de sólidos de todos los lotes de látex producidos.

Las extracciones de muestras para la determinación del contenido de sólidos, se realizaron cada 30 minutos a partir del inicio de dosificación de preemulsión. Como se observa en las siguientes gráficas, el flujo de alimentación de preemulsión fue un poco rápido provocando inundación en el seno de reacción.

A continuación se muestran las curvas de conversión de todos los lotes producidos comparando las variables de relación de monómeros y cantidad de emulsificante añadido en la semilla.



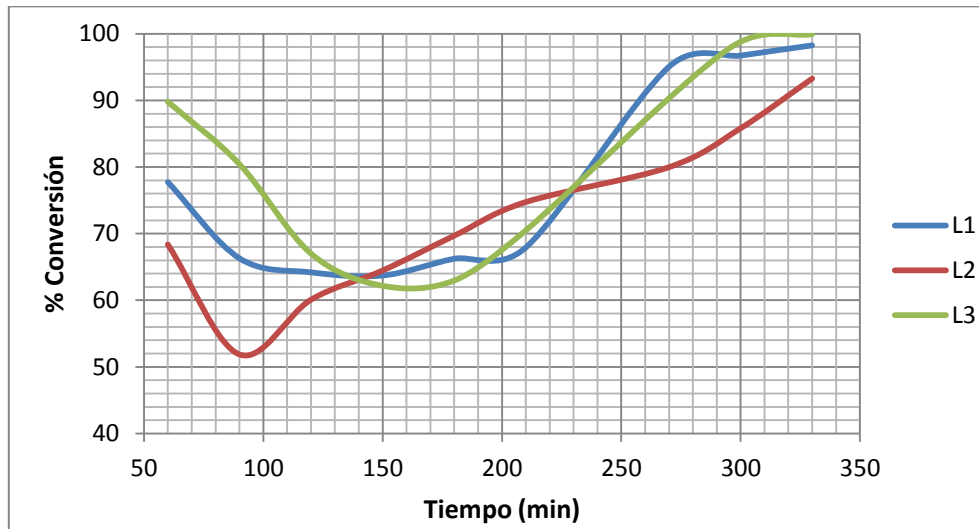
**Gráfico 4.6** Conversión vs. Tiempo de los lotes K1, K2 y K3

En la gráfica 4.6 muestra las curvas de conversión con respecto al tiempo, de los lotes de látex que contienen la mayor cantidad de emulsificante en la semilla, pero diferente relación de monómero en la composición.

Claramente se puede notar que al inicio de la dosificación de la preemulsión, hay una disminución en la conversión, esto es debido a que el flujo de alimentación es mayor al consumo o reacción del monómero para transformarse en polímero.

Específicamente en esta gráfica se pudo observar que el látex con la mayor cantidad de Acrilato de Butilo (K1), se tiene una mayor conversión antes de la dosificación de preemulsión, mientras que los látex K2 y K3 la conversión es ligeramente menor, por lo que se puede deducir que el monómero Acrilato de Butilo presenta una mayor concentración dentro de la partícula de látex debido a la alta solubilidad del Acetato de Vinilo en el medio dispersante.

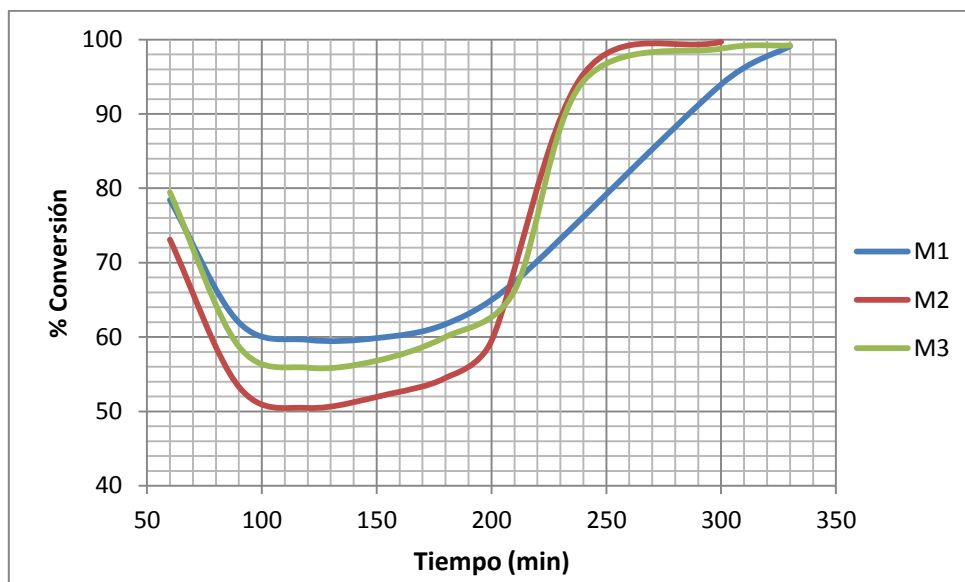
Cabe mencionar que se tuvieron algunas pequeñas variaciones en los flujos de alimentación de preemulsión en cada uno de los experimentos, pero siempre tratando de tener siempre la misma tendencia para lograr obtener una comparación en las curvas de conversión.



**Gráfico 4.7** Conversión vs. Tiempo de los látex L1, L2 y L3.

De la gráfica 4.7 se observa claramente que el lote L2 que contiene una mayor cantidad de Acetato de Vinilo (70/30) presenta una menor rapidez de conversión, mientras que los lotes L1 y L3 medianamente siguen la misma tendencia.

Lo anterior puede ser debido, de igual forma, a que el VAM en comparación con el BA presenta una mayor solubilidad en el agua y por lo tanto se observa una disminución en la conversión global con respecto a los otros lotes. Esta grafica representa los lotes que contienen la mitad de emulsificante del primer grupo de latex.

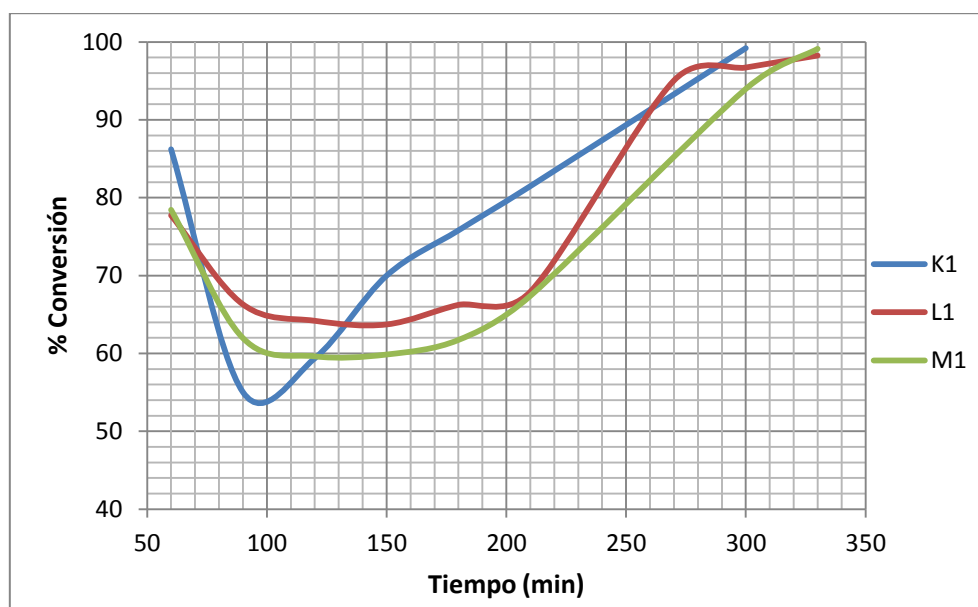


**Gráfico 4.8** Conversión vs. Tiempo de los lotes M1, M2 y M3

Nuevamente se observa una ligera disminución en la rapidez de conversión del lote con mayor cantidad de Acetato de Vinilo, pero esta vez con una aceleración al término de la dosificación de preemulsión. Por el contrario, el látex con mayor cantidad de Acrilato de Butilo tiene una mayor conversión al inicio de la dosificación, pero disminuye la rapidez de reacción al término del proceso.

La gráfica anterior representa los lotes con sólo un cuarto de la cantidad de emulsificante original presente en la etapa de semilla.

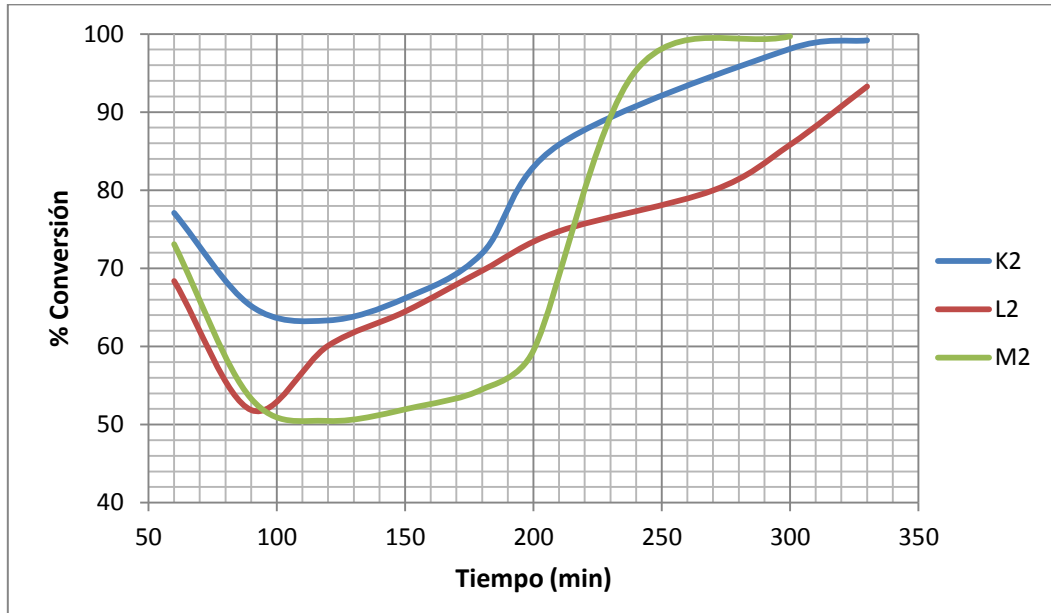
A continuación se presentan los gráficos de las curvas de conversión con respecto al tiempo comparando la cantidad de emulsificante agregado en la semilla de la reacción para las mismas relaciones en la composición.



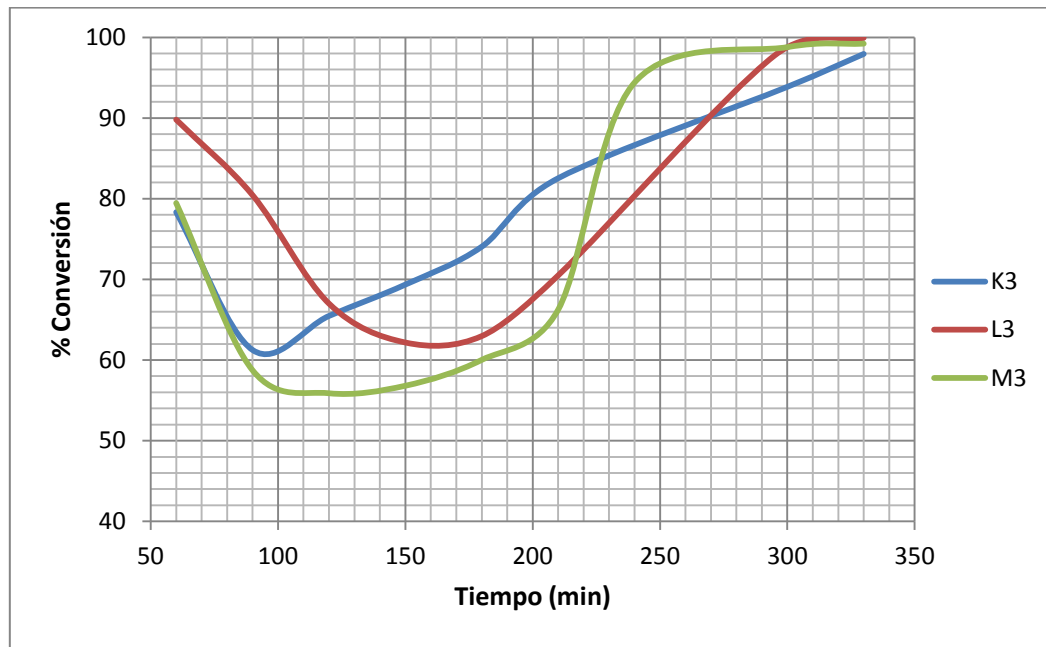
**Gráfica 4.9** Conversión vs. Tiempo de los lotes K1, L1, M1

La gráfica 4.9 representa los lotes con composición global de 60/40 pero con diferente cantidad de emulsificante en la semilla. Se observa una mayor rapidez de reacción y conversión en el lote que contiene la mayor cantidad de tensoactivo en la semilla.

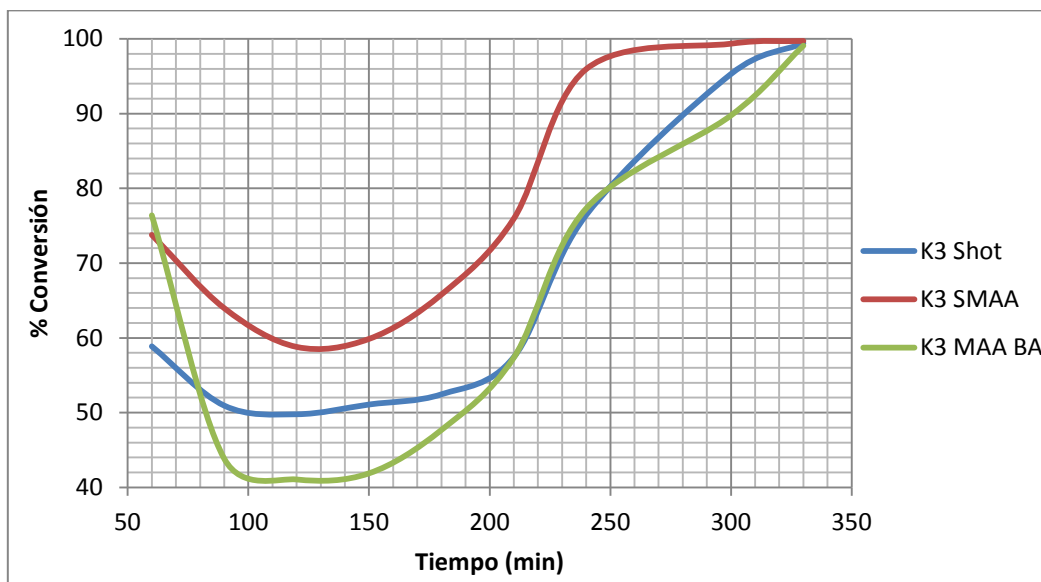




**Gráfica 4.10** Conversión vs. Tiempo de los lotes K2, L2 y M2



**Gráfica 4.11** Conversión vs. Tiempo de los lotes K3, L3 y M3



**Gráfico 4.12** Conversión vs. Tiempo Lotes K3 shot, K3 SMAA y K3 MAA+BA

La gráfica 4.12 que corresponde a lotes de pruebas exploratorias, basándose en los resultados de DSC y resistencia a la compresión de las probetas de tierra – látex,

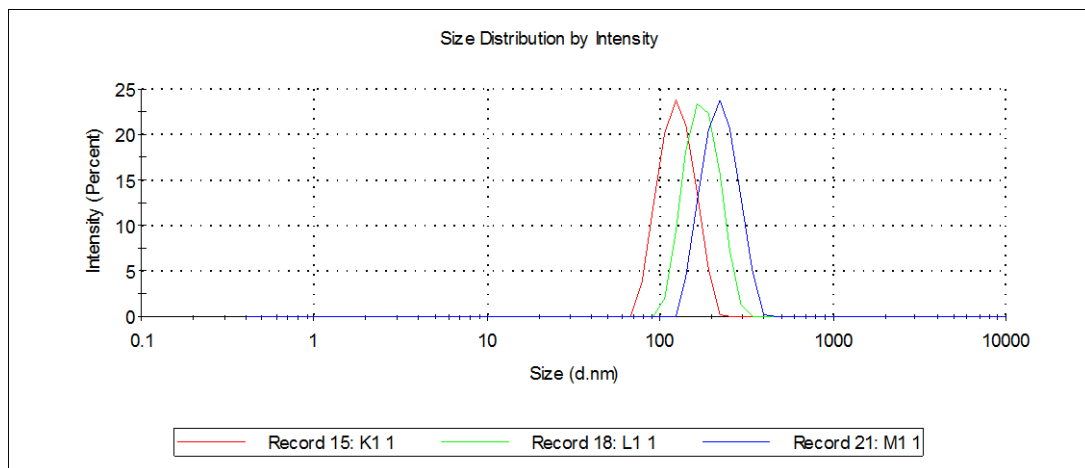
#### 4.3.2 Distribución de tamaño de partícula.

El tamaño de partícula se determinó por dispersión de luz dinámica (DLS) usando un equipo Malvern, modelo Mastersizer 2000. Con la ayuda de este aparato se determinan diámetros de partículas dentro de un intervalo de  $0.001\mu\text{m}$  a  $10\mu\text{m}$ ; donde según la configuración que se le asigne al software este podrá medir las partículas de látex como partículas huecas, sólidas o ambas. Se utilizará principalmente en este trabajo para partículas sólidas. El índice de refracción empleado fue de 1.474 que corresponde a un polímero acrílico.

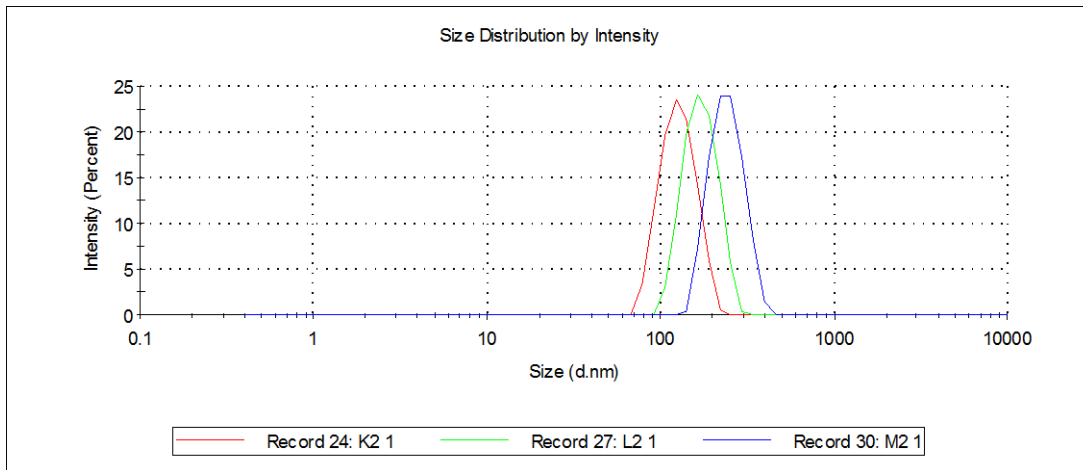
La preparación de la muestra consiste en preparar una muestra diluida de látex en agua para después someterla a una sonicación durante 3 minutos. La muestra se coloca en la celda de vidrio y ésta a su vez se coloca en la cámara portacelda en donde se hace incidir un rayo. Las fluctuaciones en la intensidad de la luz dispersada se miden a diferentes ángulos y se correlacionan con el tamaño de partícula mediante el sistema operativo del equipo.

Los resultados de tamaño de partícula se muestran en porcentaje en intensidad que es una distribución de tamaños de partícula de primer orden. La distribución de la intensidad se pondera naturalmente de acuerdo con la intensidad de la dispersión de cada fracción de partículas o de la familia. Para materiales poliméricos la intensidad de la dispersión de las partículas es proporcional al cuadrado del peso molecular. Como tal, la distribución de intensidad puede ser algo engañoso, en que una pequeña cantidad de aglomeración o presencia de partículas más grandes pueden dominar la distribución. Sin embargo esta distribución se puede utilizar como un detector sensible para la presencia de material de mayor tamaño en la muestra.

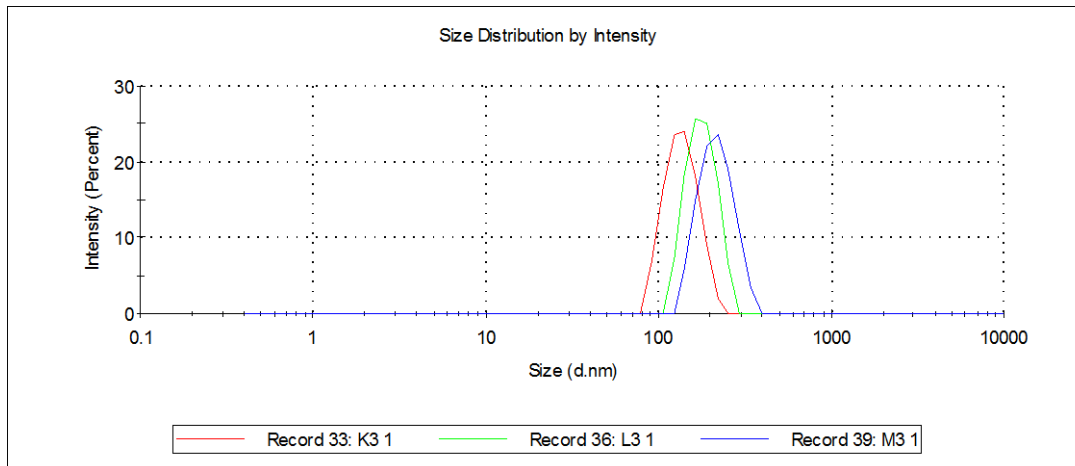
Para este caso se presentan los diámetros promedio de las partículas en intensidad, puesto que también se pueden presentar en volumen o en número. Se muestran las gráficas de los diferentes lotes producidos haciendo comparación entre ellos.



**Fig 4.1** Tamaño de partícula de lotes K1, L1 M1

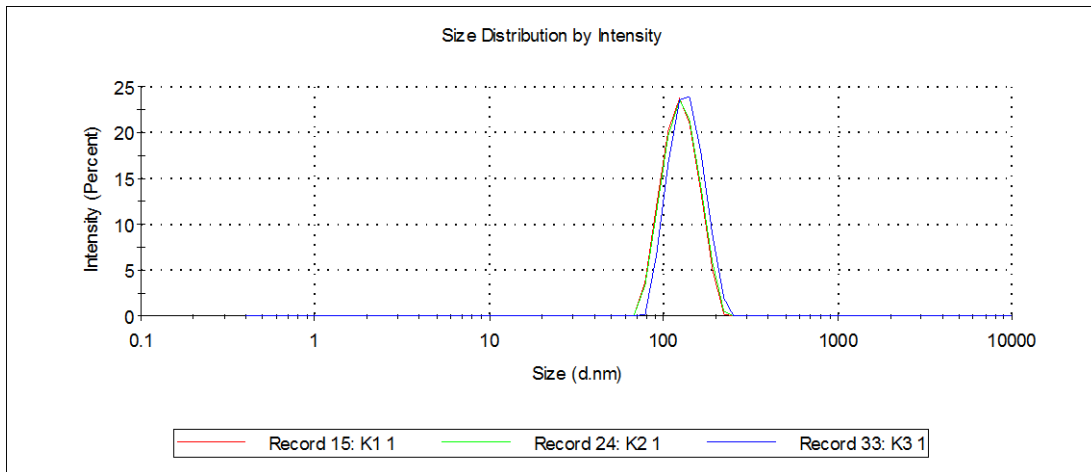


**Fig 4.2** Tamaño de partícula de los lotes K2, L2 y M2

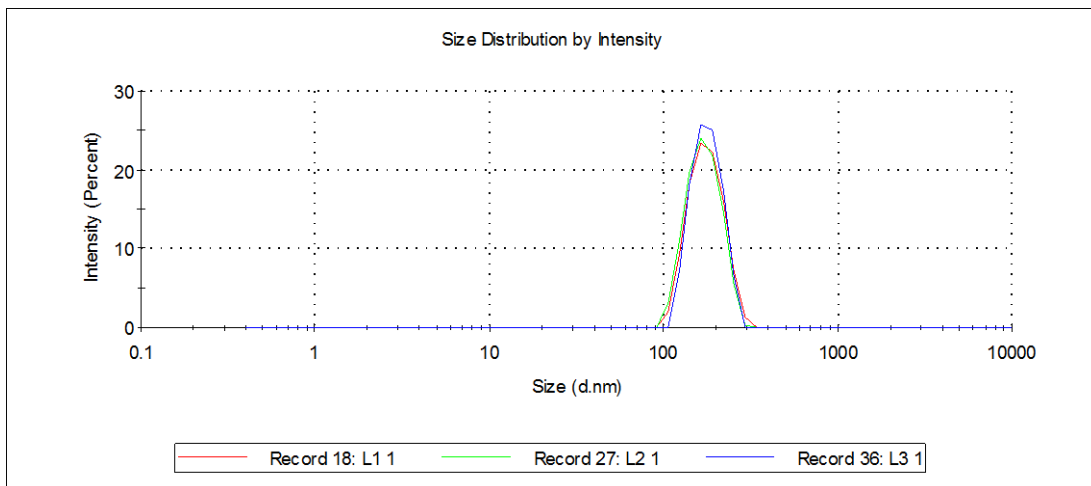


**Fig. 4.3** Tamaño de partícula de los lotes K3, L3 y M3

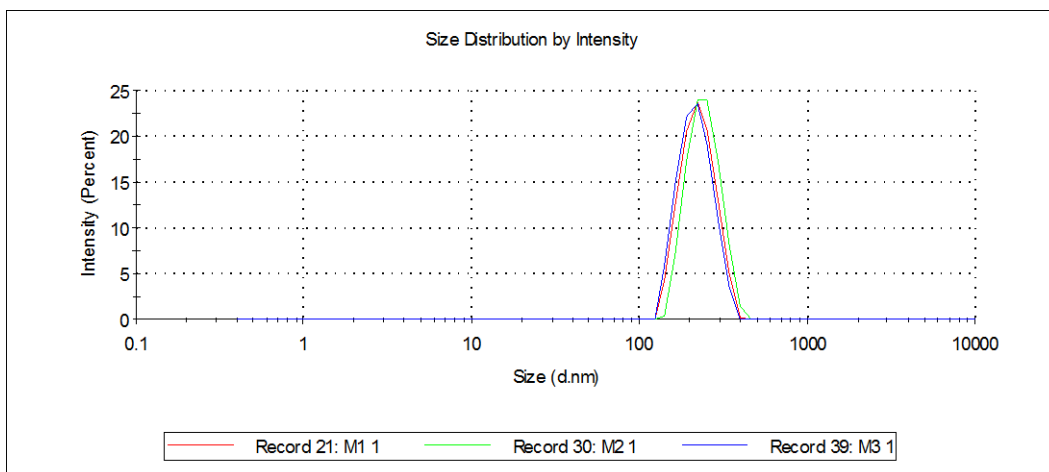
En las 3 primeras imágenes se observa claramente el efecto de colocar cantidades diferentes de emulsificante en la semilla de la reacción de polimerización. A mayor cantidad de emulsificante se logra un tamaño de partícula menor; por el contrario los lotes con una menor cantidad de emulsificante generan un mayor tamaño en la partícula de latex.



**Fig 4.4** Tamaño de partícula de los lotes K1, K2 y K3



**Fig. 4.5** Tamaño de partícula de los lotes L1, L2 y L3



**Fig. 4.6** Tamaño de partícula de los lotes M1, M2 y M3.

Las siguientes tres imágenes muestran que no hay influencia en el tamaño de partícula debido a la composición del copolímero. Todos los latex producidos no presentaron inestabilidad alguna durante el proceso de polimerización; también se generó muy poca incrustación y/o grumo en la propela y las paredes del reactor.

Los valores de tamaño de partícula promedio para los niveles de emulsificante se muestran en la siguiente tabla de forma condensada:

<b>Látex</b>	<b>VAM/BA</b>	<b><i>T<sub>p</sub></i> (nm)</b>
K1	60/40	121
K2	70/30	122.34
K3	65/35	133.42
L1	60/40	171.32
L2	70/30	166.86
L3	65/35	173.12
M1	60/40	216.6
M2	70/30	234.6
M3	65/35	209.92
K3 0/100	65/35	
K3 SMAA	65/35	
K3 BA/MAA	65/35	

**Tabla. 4.9** *Tamaño de partícula promedio de todos los latex producidos.*

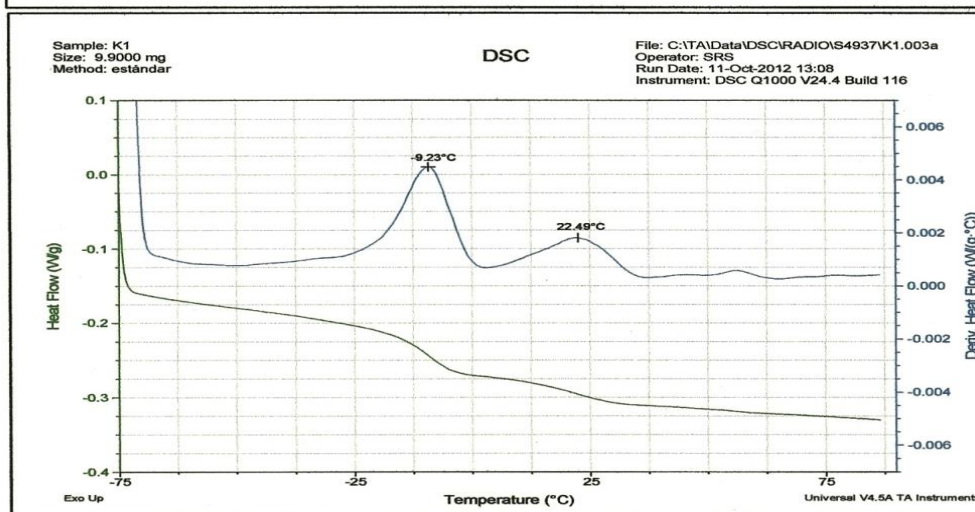
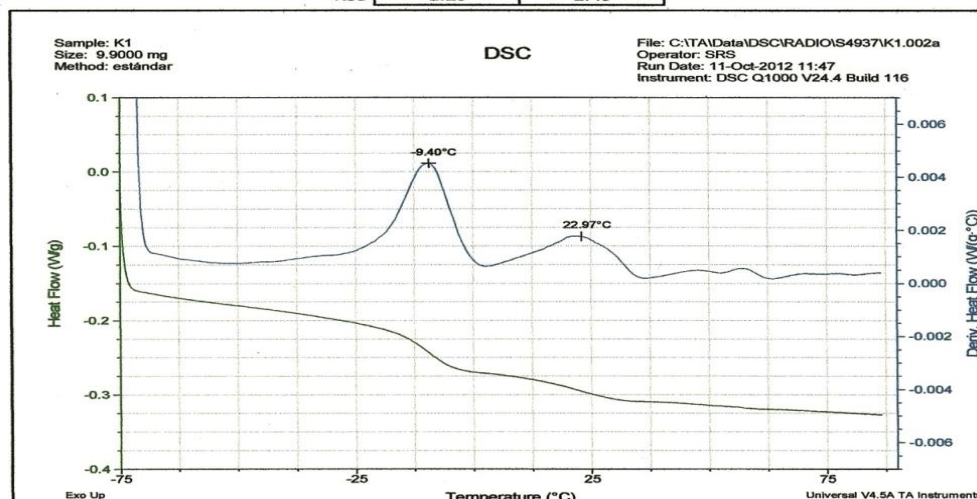
#### **4.3.3 Determinación de *T<sub>g</sub>* mediante calorimetría diferencial de barrido.**

La calorimetría diferencial de barrido (DSC por sus siglas en inglés) es un método con el cual se miden los cambios de flujo de energía de un material al calentarlo, asociados a un cambio de fase, que puede ser endotérmico o exotérmico dependiendo del fenómeno asociado a esa temperatura. Mediante esta técnica se mide específicamente la temperatura y los flujos de calor asociados a las transiciones de los materiales, estas mediciones proporcionan información cualitativa y cuantitativa de procesos endotérmicos o exotérmicos, así como cambios en su capacidad calorífica.

En general, los fenómenos físicos que se pueden estudiar son la fusión, cristalización, sublimación, transición vítrea, transiciones de fase en cristal líquido. Los fenómenos químicos que se pueden estudiar son la descomposición,

polimerización, deshidratación y reacciones en estado sólido y líquido. En la gráfica obtenida de flujo de Calor contra temperatura, si se obtiene el área bajo la curva generada en las transiciones y se toma en cuenta el peso de la muestra, se conoce la cantidad de calor asociado al fenómeno, que es una propiedad importante del material. Se puede calcular por ejemplo, cuánta energía se generará cuando determinada cantidad de material forma una estructura cristalina.

K1				
Archivo	Barrido de Temperatura (°C)	T <sub>g</sub> 1(°C)	T <sub>g</sub> 2(°C)	Observaciones
K1.001	-50 a 150	-9.01	26.49	Exploratorio
K1.002	-75 a 90	-9.40	22.97	DSC estándar
K1.003	-75 a 90	-9.23	22.49	DSC estándar
K1mod.001	-80 a 150	-7.67	23.55	DSC modulado
K1.004	-75 a 90	-8.90	25.15	DSC estándar
Promedio		-9.32	22.73	
Desv. Est.		0.12	0.34	
RSD		1.29	1.49	



**Fig. 4.7** Resultados DSC para muestra K1 (60% VAM / 40% BA)

K2

Archivo	Barrido de Temperatura (°C)	T <sub>g 1</sub> (°C)	T <sub>g 2</sub> (°C)	Observaciones
K2.001	-50 a 150	2.06	27.56	Exploratorio
K2.002	-70 a 90	2.42	25.23	DSC estándar
K2.003	-70 a 90	2.42	25.56	DSC estándar
Promedio		2.42	25.40	
Desv. Est.		0.00	0.23	
RSD		0.00	0.92	

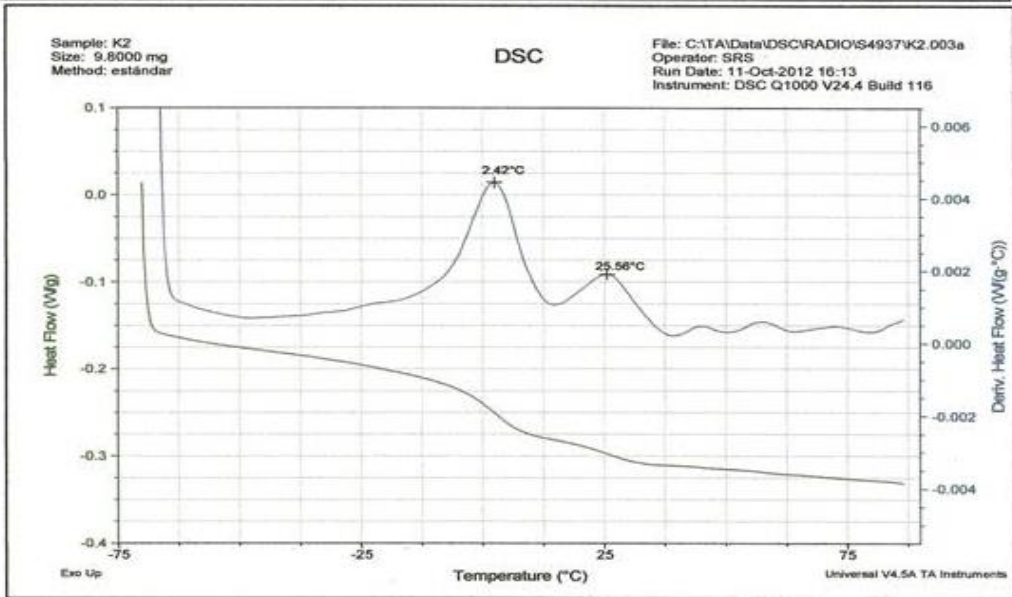
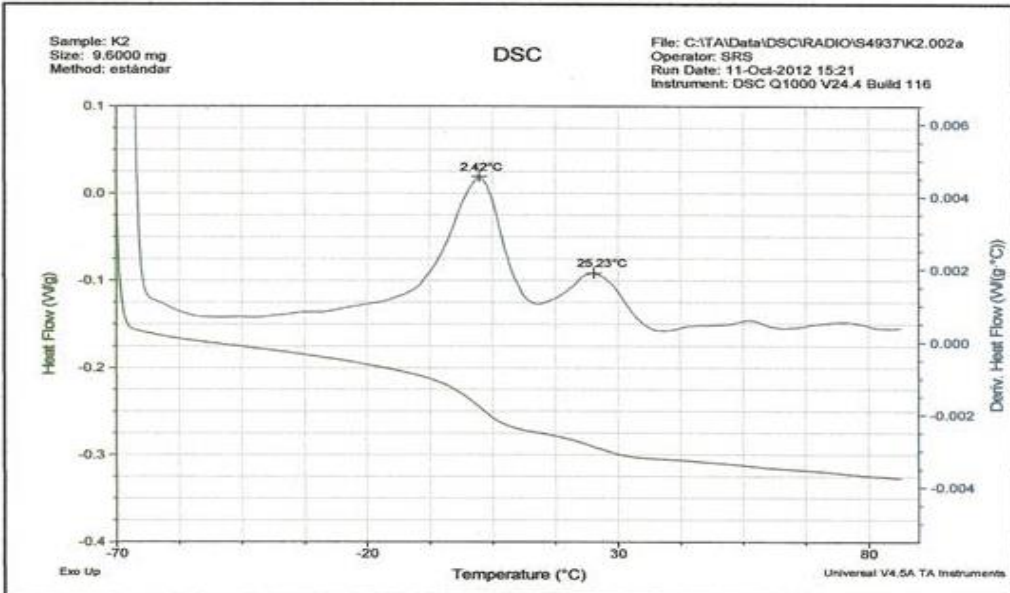


Fig 4.8 Resultados DSC para muestra K2 (70% VAM / 30% BA)



K3

Archivo	Barrido de Temperatura (°C)	T <sub>g 1</sub> (°C)	T <sub>g 2</sub> (°C)	Observaciones
K3.001	-50 a 150	-4.26	23.24	Exploratorio
K3.002	-80 a 90	-3.09	23.91	DSC estándar
K3.003	-80 a 90	-3.32	24.89	DSC estándar
K3.004	-80 a 90	-2.80	25.38	DSC estándar
K3.005	-80 a 90	-3.32	24.64	DSC estándar
Promedio		-3.32	24.77	
Desv. Est.		0.00	0.18	
RSD		0.00	0.71	

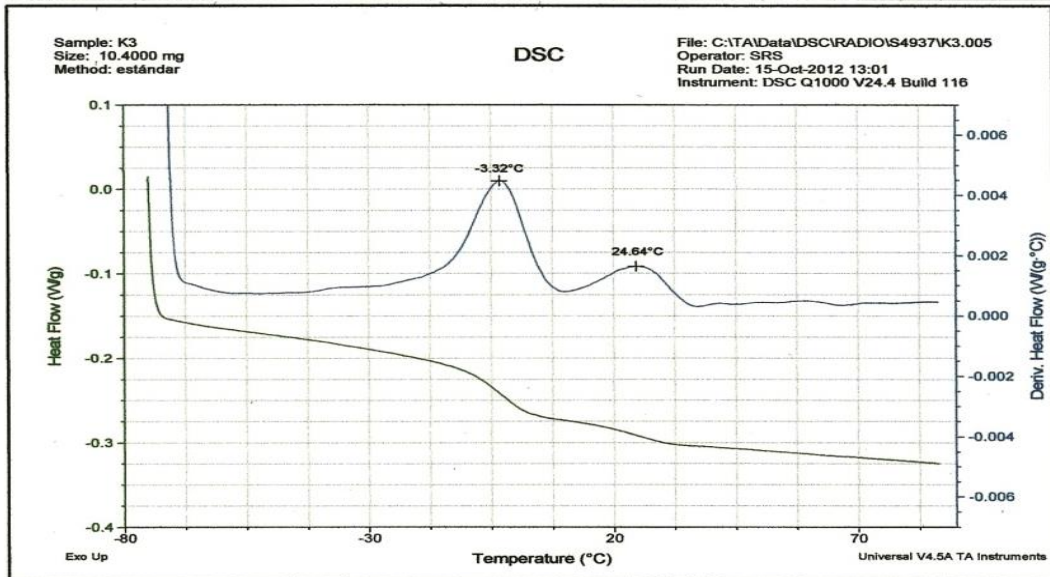
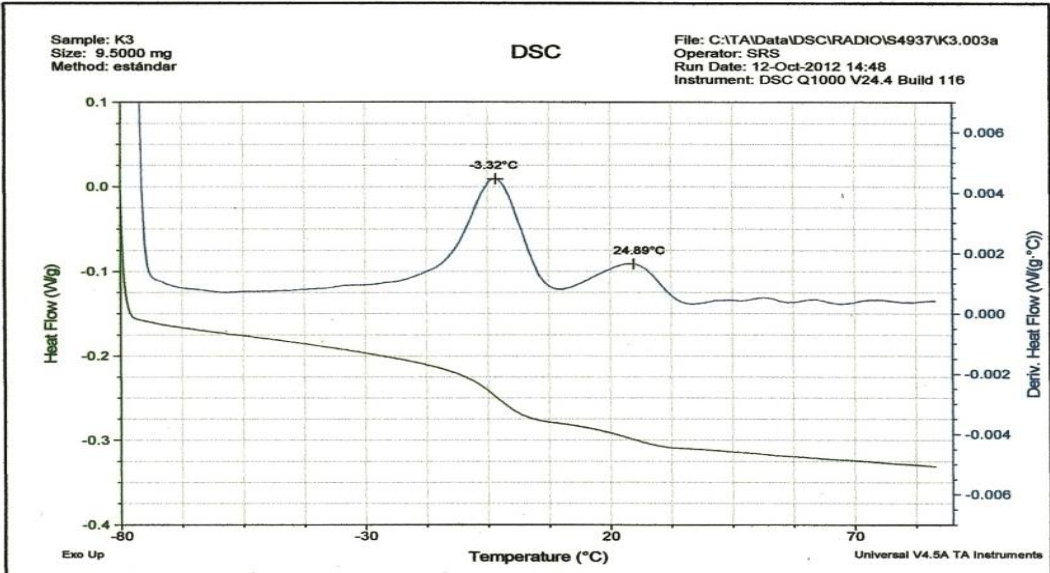


Fig. 4.9 Resultados DSC de la muestra K3 (65% VAM / 35% BA)

Las figuras anteriores muestran las determinaciones de DSC para las muestras de K1, K2 y K3; ya que para los 6 lotes posteriores se repiten las composiciones de monómeros. Se elaboraron dos corridas por cada muestra mostrándose en cada gráfica la derivada del flujo de calor implementado a la muestra.

Las estimaciones del valor de  $T_g$  se realizaron mediante la ecuación de Fox, la cual se requiere esté por debajo de la temperatura ambiental, para que el material estabilizante tenga una buena resistencia y buena cohesión de las partículas de tierra a temperatura ambiente. La ecuación de Fox para un copolímero estima que éste está conformado aleatoriamente y sólo muestra una temperatura de transición.

A continuación se muestra una tabla con los datos de  $T_g$  real de los lotes de látex y la  $t_g$  teórica calculada con la ecuación de Fox.

<b>Látex</b>	<b>VAM/BA</b>	<b><math>T_{g1}</math> (°C)</b>	<b><math>T_{g2}</math> (°C)</b>	<b><math>T_g</math> ec. Fox (°C)</b>
K1	60/40	-9.4	22.97	-9.40
K2	70/30	2.42	25.23	-0.14
K3	65/35	-3.32	24.89	-4.85
K3 0/100	65/35	-3.32	24.89	-4.85
K3 SMAA	65/35	-3.32	24.89	-4.85
K3 BA/MAA	65/35	-3.32	24.89	-4.85

**Tabla 4.10** Resultados de DSC y  $t_g$  teórica para las diferentes proporciones de monómero

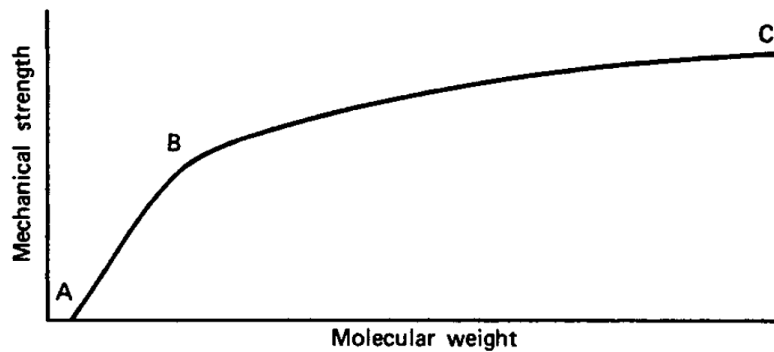
Como se observa tanto en la tabla anterior como en las figuras de DSC, se tiene 2 zonas de transición de temperatura; la primera  $T_g$  observada está muy cercana a la  $T_g$  teórica. Después existe una segunda zona de transición la cual está muy por encima de la primera zona de transición y de la  $T_g$  teórica.

De lo anterior se puede concluir que existe una deriva de composiciones en el copolímero, sobre todo en la segunda zona de transición donde es probable una alta concentración de poliacetato de vinilo.

---

#### 4.3.4 Peso Molecular

Muchas de las propiedades mecánicas de un material polimérico dependen y varían de acuerdo a su peso molecular. De las propiedades más comunes de un polímero tenemos las propiedades mecánicas como dureza, rigidez, fuerza y viscosidad así como la temperatura de transición de sólidos a hules y/o ceras. Existe un peso molecular mínimo, usualmente de miles para generar una resistencia mecánica, por encima de este punto la resistencia crece rápidamente con el peso molecular hasta un punto crítico donde la dureza del material crece lentamente con respecto al peso molecular.



*Fig. 4.10 Curva de esfuerzo mecánico vs. Peso molecular*

Los polímeros sintético y la mayoría de los naturales están formados por una mezcla de moléculas que han alcanzado diferente grado de polimerización, y por lo tanto, diferente peso molecular. En los polímeros sintéticos obtenidos por polimerización en cadena, la longitud de la cadena está determinada por el tiempo que la cadena está creciendo o el tiempo de reacción. Las etapas de iniciación, terminación, propagación y transferencia corresponden a fenómenos al azar.

En el caso de las reacciones de polimerización por etapas, la longitud de cadena está determinada por la disponibilidad local de grupos reactivos en los extremos de cadenas en crecimiento. En cualquier caso, el polímero contiene moléculas que poseen longitudes de cadena muy diferente; de modo que en una muestra de polímero nos encontramos con una distribución de pesos moleculares.

---

Existen 2 maneras comunes de expresar el peso molecular promedio de un polímero. La primera se basa en las propiedades coligativas de un polímero en solución, es decir, toma en cuenta el número de partículas presentes en la muestra; a este promedio se le conoce como Peso Molecular Promedio en Número.

El peso molecular promedio en número ( $M_n$ ) se define como el peso total de la muestra de polímero dividido entre el número total de cadenas, lo cual resulta en una media aritmética como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\overline{M}_N = \frac{\sum_{i=1}^{\infty} N_i M_i}{\sum_{i=1}^{\infty} N_i} \quad \text{..... Ec. 4.1}$$

Por otra parte el Peso Molecular Promedio en Peso, es aquel donde la medición toma en cuenta el tamaño de las partículas, como la dispersión de luz y corresponde estadísticamente a una media cuadrática.

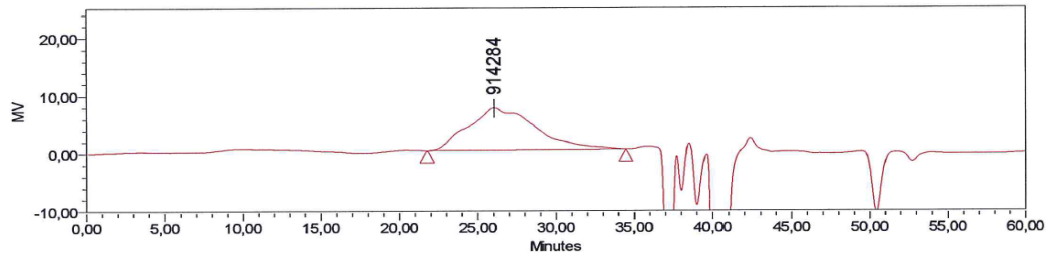
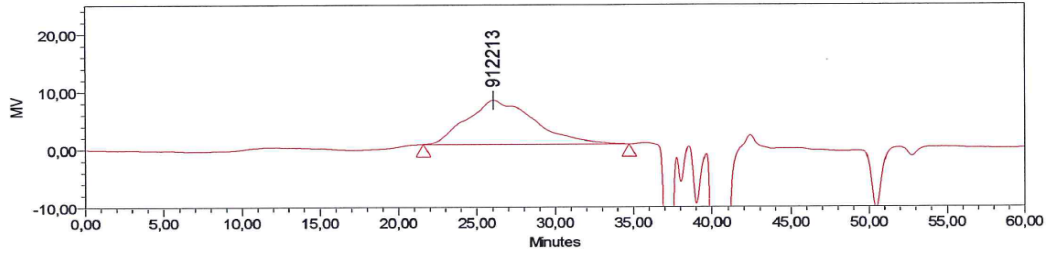
$$\overline{M}_W = \frac{\sum_{i=1}^{\infty} N_i M_i^2}{\sum_{i=1}^{\infty} N_i M_i} \quad \text{..... Ec 4.2}$$

La determinación de pesos moleculares promedio para las muestras de latex, se determina por GPC. Esta técnica de análisis consiste en inyectar una muestra de polímero disuelto en solvente por una columna de un copolímero de Poliestireno / Divinilbenceno, donde un detector muestra la intensidad que representa el número de partículas que salen de dicha columna.

A continuación se muestran los resultados de GPC de los primeros nueve lotes producidos.

**GPC Results**

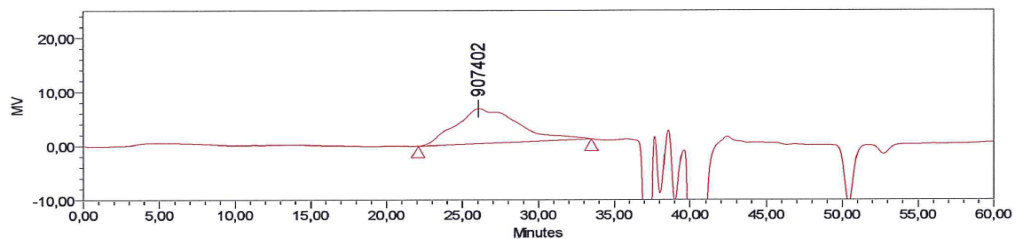
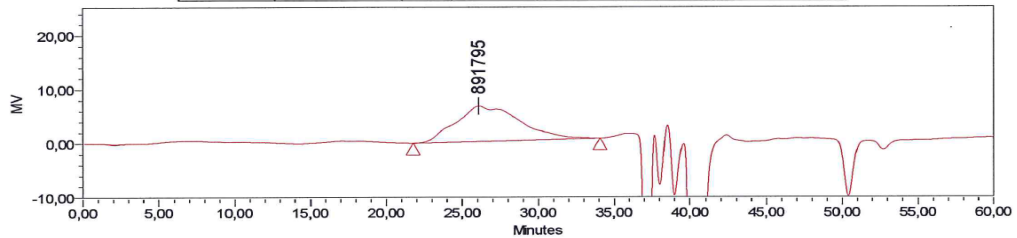
	SampleName	Vial	Injection	Mn	Mw	Polydispersity
1	K-1	14	2	268695	1454129	5,411815
2	K-1	14	3	260886	1398635	5,361096
Mean				264791	1426382	5,39
Std. Dev.				5522	39240	0,04
% RSD				2	3	0,67



**Fig. 4.11 Mn, Mw y Polidispersidad del Látex K1**

**GPC Results**

	SampleName	Vial	Injection	Mn	Mw	Polydispersity
1	K-2	15	1	267517	1216074	4,545780
2	K-2	15	2	275038	1228457	4,466505
3	K-2	15	3	270105	1277065	4,728036
Mean				270887	1240532	4,58
Std. Dev.				3821	32239	0,13
% RSD				1	3	2,93



**Fig. 4.12 Mn, Mw y Polidispersidad del Látex K2**

### GPC Results

	SampleName	Vial	Injection	Mn	Mw	Polydispersity
1	K-3	16	1	290105	1298167	4,474817
2	K-3	16	2	305152	1350194	4,424661
3	K-3	16	3	294522	1254347	4,258921
Mean				296593	1300902	4,39
Std. Dev.				7734	47982	0,11
% RSD				3	4	2,58

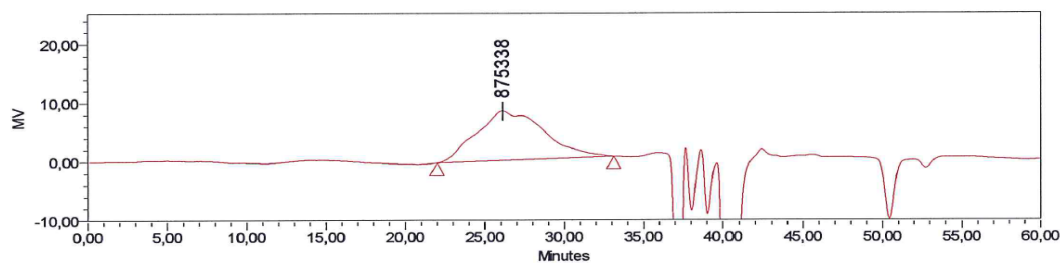
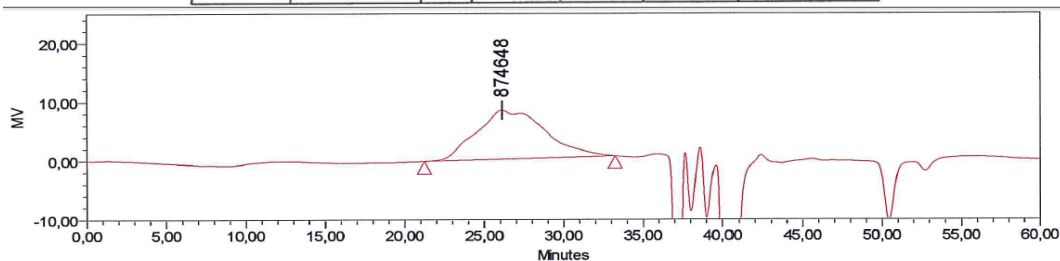


Fig. 4.13 Mn, Mw y Polidispersidad del Látex K3

### GPC Results

	SampleName	Vial	Injection	Mn	Mw	Polydispersity
1	L-1	12	1	290670	1287849	4,430627
2	L-1	12	2	278233	1234169	4,435746
3	L-1	12	3	283567	1245814	4,393366
Mean				284156	1255944	4,42
Std. Dev.				6239	28237	0,02
% RSD				2	2	0,52

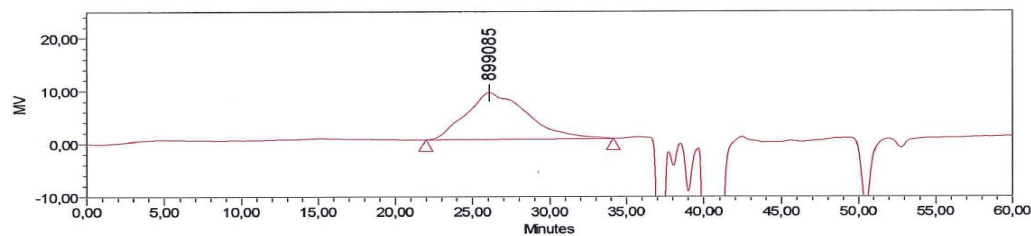
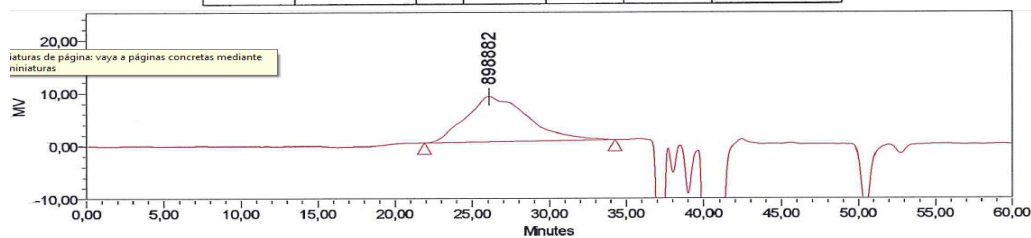
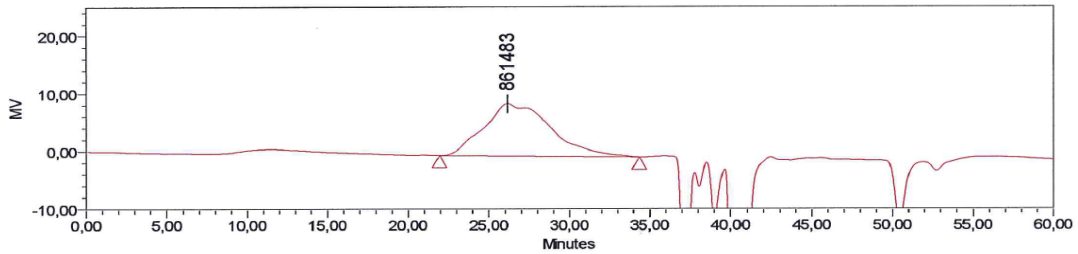
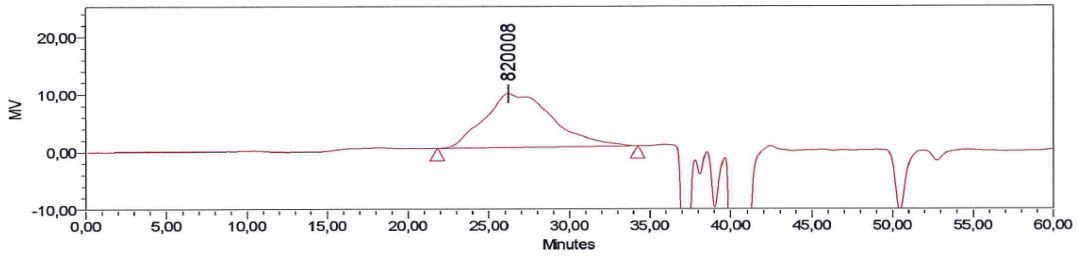


Fig. 4.14 Mn, Mw y Polidispersidad del Látex L1

**GPC Results**

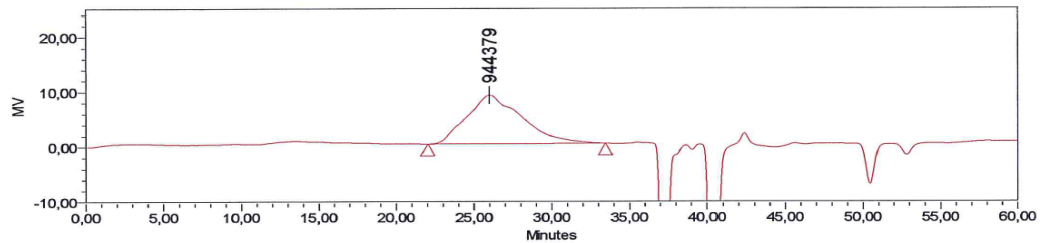
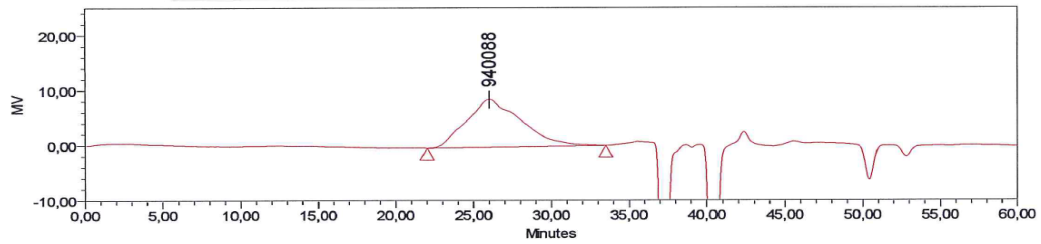
	SampleName	Vial	Injection	Mn	Mw	Polydispersity
1	L-2	13	1	245357	1131298	4,610819
2	L-2	13	2	242751	1093076	4,502874
3	L-2	13	3	257716	1137376	4,413298
Mean				248608	1120583	4,51
Std. Dev.				7995	24015	0,10
% RSD				3	2	2,19



**Fig. 4.15** Mn, Mw y Polidispersidad del Látex L2

**GPC Results**

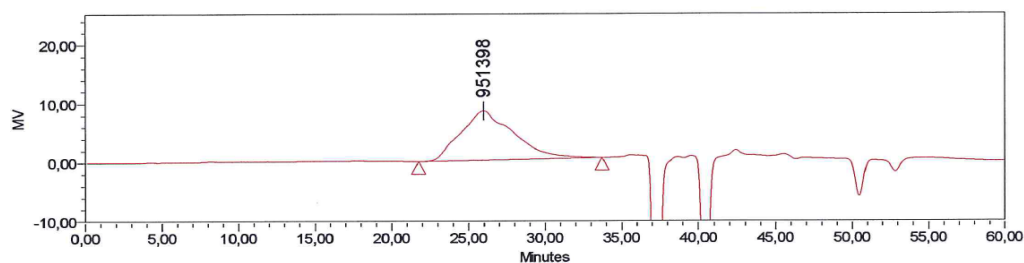
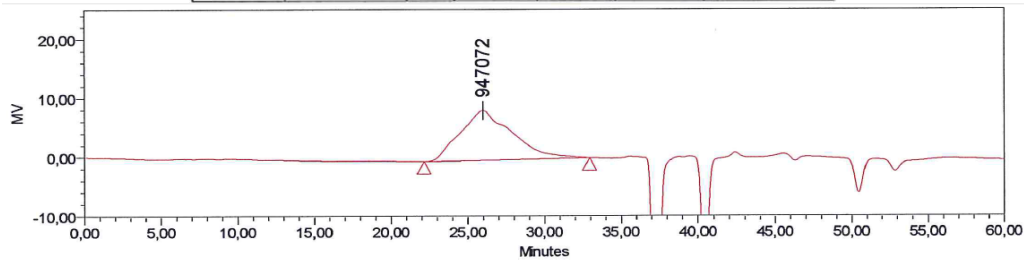
	SampleName	Vial	Injection	Mn	Mw	Polydispersity
1	M-1	18	1	375443	1325582	3,530711
2	M-1	18	3	362715	1320108	3,639513
Mean				369079	1322845	3,59
Std. Dev.				9000	3871	0,08
% RSD				2	0	2,15



**Fig. 4.16** Mn, Mw y Polidispersidad del Látex M1

### GPC Results

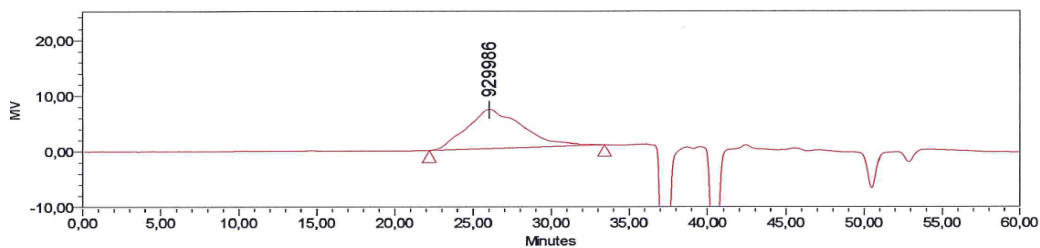
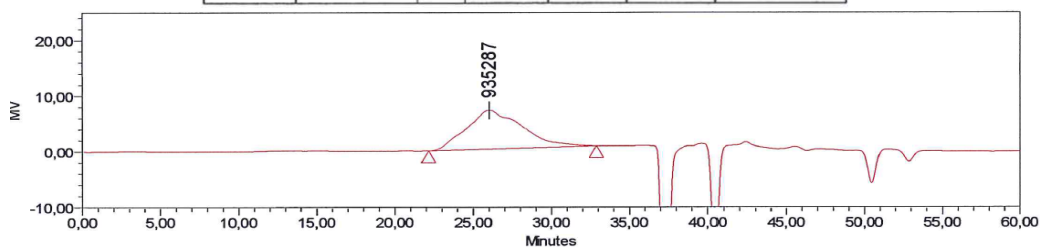
	SampleName	Vial	Injection	Mn	Mw	Polydispersity
1	M-2	19	1	402659	1366652	3,394070
2	M-2	19	2	380888	1365736	3,585661
3	M-2	19	3	402412	1357578	3,373602
Mean				395320	1363322	3,45
Std. Dev.				12499	4995	0,12
% RSD				3	0	3,39



**Fig. 4.17** Mn, Mw y Polidispersidad del Látex M2

### GPC Results

	SampleName	Vial	Injection	Mn	Mw	Polydispersity
1	M-3	20	1	377750	1309441	3,466419
2	M-3	20	2	360871	1295559	3,590092
3	M-3	20	3	379852	1316083	3,464730
Mean				372824	1307028	3,51
Std. Dev.				10405	10472	0,07
% RSD				3	1	2,05



**Fig. 4.18** Mn, Mw y Polidispersidad del Látex M3

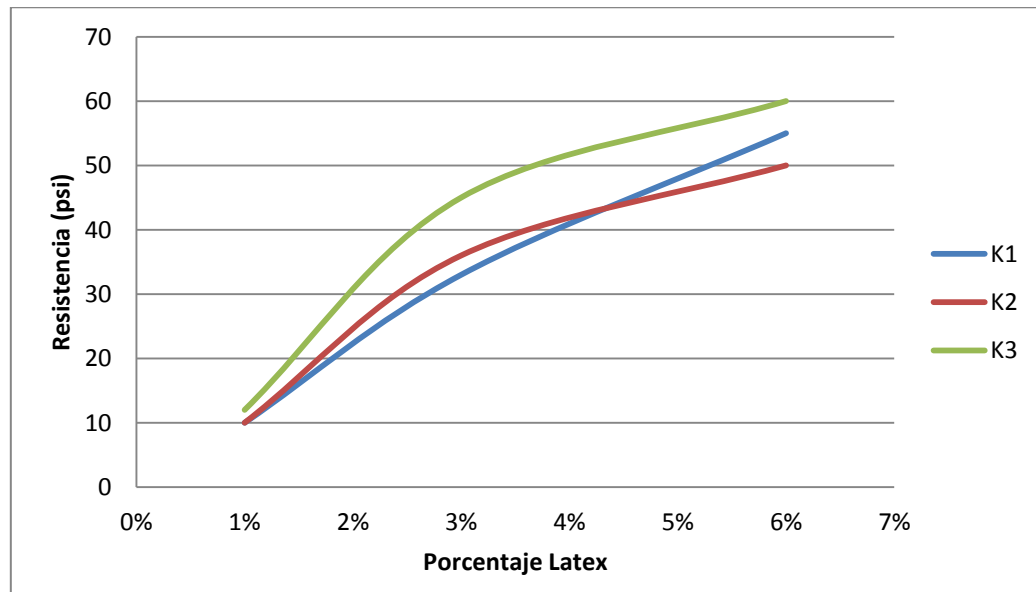


#### 4.4 Pruebas de Compresión de probetas Tierra – Látex.

Una vez sintetizado el látex y conociendo su porcentaje en sólidos finales, se procede a elaborar probetas de tierra – látex como previamente se mencionó en el capítulo 3. Los porcentajes arbitrariamente establecidos para la elaboración de las probetas fueron 1%, 3% y 6% en peso seco de látex.

En primer lugar se realizó la prueba de compresión de las probetas con los látex correspondientes a los lotes K1, K2 y K3 para conocer la proporción de monómeros que soporta una mayor resistencia a la compresión.

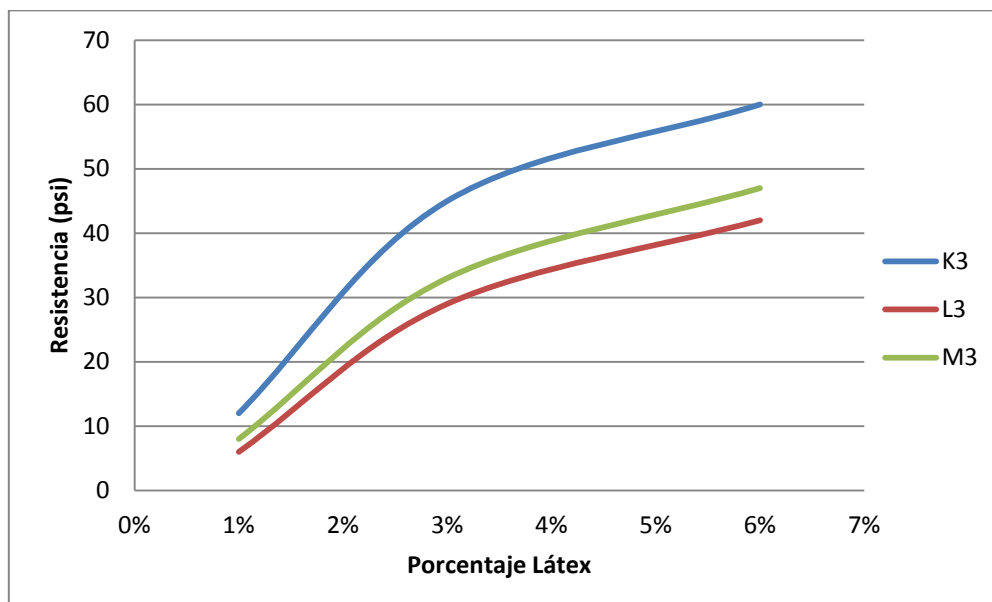
Como resultado de esta primera prueba tenemos la gráfica 4.13 que muestra la resistencia a la compresión de las probetas con respecto al porcentaje de látex que contiene cada una de ellas para los lotes con mayor contenido de emulsificante.



**Gráfica 4.13** Resistencia a la compresión vs. Porcentaje en peso de látex

En el gráfico anterior se observa claramente que la probeta con la mayor resistencia a la compresión es aquella que está elaborada con el látex K3 (65% VAM / 35% BA). Cabe mencionar que durante la prueba de compresión para esta serie de probetas, no hubo ruptura alguna de la misma, pero sí se aprecia una ligera deformación, sobre todo en aquellas de menor contenido de látex.

Posteriormente se elaboran las probetas con los lotes K3, L3 y M3 para evaluar el desempeño que tiene el látex con la misma composición a diferente tamaño de partícula. Los resultados de las pruebas de compresión se muestran en la siguiente gráfica.



**Gráfica 4.14** Resistencia a la compresión vs. Porcentaje en peso de látex.

Con base en la gráfica 4.14 se puede concluir que existe un efecto en la resistencia a la compresión debido al tamaño de partícula del látex, a menor tamaño de partícula mayor resistencia; las propiedades de estabilización aumentan con el número de partículas.

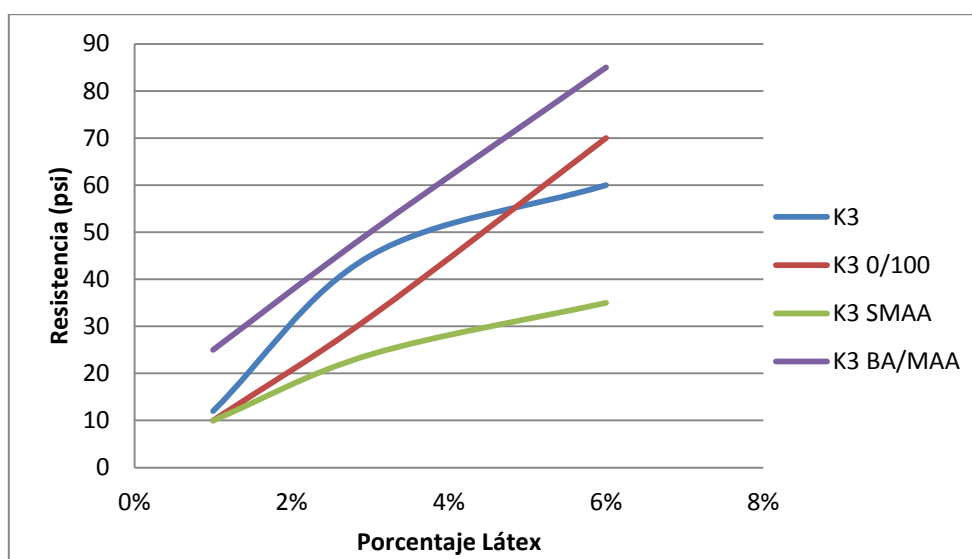
En esta serie de pruebas de compresión sí hubo ruptura en 2 probetas de tierra – látex, y corresponde a los látex L3 y M3 e al 1% en peso; el resultado de la ruptura fue en la fragmentación de la probeta en grandes trozos.

Una vez hecho la conclusión que, el latex que presenta una mejor desempeño a la prueba de compresión debido a su composición y tamaño de partícula, es el lote de nominado K3, se procede a elaborar pruebas exploratorias para evaluar el efecto de carboxilar con Ácido Metacrílico la partícula de látex.

Estas pruebas exploratorias consisten en realizar 2 síntesis del lote K3; la prime de ellas igual cantidad de emulsificante, misma composición monomérica pero sin ácido Metacrílico al cual se le denominó *K3 SMAA*

La segunda síntesis consiste en una adición de ácido Metacrílico a las 2 hrs. de haber iniciado la alimentación de preemulsión, dando lugar a una partícula recubierta en su mayoría por MAA, el cual se denomina *K3 0/100*.

Posteriormente se sintetizó un tercer lote de latex, basado en los resultados de DSC y las pruebas de compresión de K3 modificando la composición de VAM y BA tanto en la semilla como en la preemulsión, teniendo como resultado una mayor concentración de VAM en la semilla, y así poder modificar su  $T_g$ . Este último lote recibe el nombre de *K3 BA/MAA*.



**Gráfica 4.15** Resistencia a la compresión vs. Porcentaje en peso de látex.

La gráfica anterior muestra que hay un efecto en la carboxilación de la partícula con MAA, el lote K3 SMAA muestra una resistencia a la compresión muy por debajo de los demás lotes sintetizados; mientras que el lote con la adición en preemulsión de MAA supera la resistencia a la compresión de los látex K3 SMAA y K3; lo que indica que efectivamente la partícula de látex está recubierta en su mayoría por MAA, el cual está mejor adherido a las partículas de tierra.

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES.

### 5.1 Análisis de Resultados

El presente capítulo se expone los análisis de los resultados de la caracterización de los lotes de látex sintetizados y el resultado de las pruebas de compresión de las probetas tierra – látex.

Se hace un análisis en cómo afectan las variables de formulación en el desempeño de la resistencia a la compresión de cada probeta y como es que se puede hacer una mejora con base a los resultados obtenidos.

En primer lugar se elabora un análisis sobre la composición monomérica del látex y la cantidad de emulsificante, la cual tiene un impacto directo sobre el tamaño de partícula; dicho análisis se basa en los resultados de pruebas de compresión de las probetas de tierra – látex.

Látex	VAM/BA	Tg1 (°C)	Tg2 (°C)	Tp (nm)	Resistencia (psi)		
					1%	3%	6%
K1	60/40	-9.4	22.97	121	10	33	55
K2	70/30	2.42	25.23	122.34	10	36	50
K3	65/35	-3.32	24.89	133.42	<b>12</b>	<b>45</b>	<b>60</b>
L1	60/40	-9.4	22.97	171.32	X	X	X
L2	70/30	2.42	25.23	166.86	X	X	X
L3	65/35	-3.32	24.89	173.12	6*	29	42
M1	60/40	-9.4	22.97	216.6	X	X	X
M2	70/30	2.42	25.23	234.6	X	X	X
M3	65/35	-3.32	24.89	209.92	8*	33	47
K3 0/100	65/35	-3.32	24.89	129.50	10	32	70
K3 SMAA	65/35	-3.34	24.90	129.89	10	24	35
K3 BA/MAA	65/35	-2.90	22.97	130.10	25	50	85

**Tabla 5.1** Resultados de Tg, Tamaño de partícula y resistencia a la compresión de los látex sintetizados en el presente trabajo.

La tabla 5.1 muestra que en los primeros 3 látex, K3 muestra una mayor resistencia a la compresión. Posteriormente se comprara esa misma relación de monómero pero con distinto tamaño de partícula; el resultado es que, con la composición de K3 y el menor tamaño de partícula se obtiene mejores propiedades del material polimérico. Cabe mencionar que en los primeros

---

experimentos se mantuvo constante la cantidad de Ácido Metacrílico, es decir, se mezcló de manera uniforme junto con los demás monómeros.

Posteriormente, con la modificación en la formulación de K3, se sintetizan 3 nuevos lotes basándose no solo en los resultados de compresión, sino que también en los datos obtenidos de DSC; el resultado es una mejora en las propiedades de resistencia del material polimérico. Esto se observa en la prueba de compresión, donde el nuevo material junto con la tierra, resiste más presión que aquel con la fórmula original de K3.

Al mismo tiempo se observa que sí hay un efecto en la estrategia de adición del MAA, el cual resulta tener mejor desempeño si se adiciona 30 minutos antes que finalice la dosificación de preemulsión, con el objetivo de tener una partícula de latex recubierta en su mayoría por grupos Carboxilo que mejoran la cohesión con las partículas de tierra.

Con respecto a los pesos moleculares del material, se observa que estos son inconsistentes, ya que en todos los casos, las muestras de polímero sometidas a GPC, fueron parcialmente solubles en DMF; de hecho el látex L3 no presenta resultados de GPC ya que resulta insoluble para preparar la muestra. La causa es que probablemente se tenga un alto entrecruzamiento de las cadenas de polímero debido a reacciones de transferencia al polímero. Éste fenómeno resulta muy común en aquellas polimerizaciones que contienen eslabones Acetato de Vinilo en su composición.

<b>Látex</b>	<b>Mn</b>	<b>Mw</b>	<b>PDI</b>
K1	264791	1426382	5.39
K2	270887	1240532	4.58
K3	296593	1300902	4.39
L1	284156	1255944	4.42
L2	248608	1120583	4.51
L3	<i>Muestra no Soluble</i>		
M1	369079	1322845	3.59
M2	395320	1363322	3.45
M3	372824	1307028	3.51

**Tabla 5.2** Resultados de GPC para los primeros 9 lotes.

---

Por ultimo analizando las curvas de conversión de la reacción de polimerización, se observa que aun manteniendo el látex una hora posterior al término de la adición de preemulsión (agotamiento térmico) y añadiendo Hidrosulfito de Sodio posterior a la reacción, esta no llega al 100% de conversión. Lo anterior se debe probablemente a la alta solubilidad del monómero Acetato de Vinilo en el medio dispersante, lo cual sugiere un mayor tiempo de residencia del látex posterior al término de adición de preemulsión.

## **5.2 Conclusiones.**

Del presente trabajo se puede concluir que, la polimerización en emulsión resulta muy adecuada para el objetivo que es la estabilización de suelo, ya que la aplicación se puede dar de forma directa.

El proceso semi – continuo, permite tener un mayor control sobre las variables de proceso que puedan modificar el desempeño de un material a sintetizar, lo cual lo convierte en una herramienta muy útil para ensayos de investigación y desarrollo.

Los objetivos previamente establecidos se cumplen en su mayoría, con excepción del resultado de peso molecular por GPC para algunas muestras, el cual solo es un indicativo del fenómeno presente dentro de las partículas de látex (alto entrecruzamiento) y no es de gran trascendencia en el objetivo principal del presente trabajo.

El empleo de un tensoactivo iónico y un tensoactivo no iónico garantizan una estabilización de las partículas de látex durante y después del proceso de polimerización, además de permitir modificar la cantidad de los mismos variando el tamaño de partícula sin riesgo de desestabilización del látex.

Las pruebas de caracterización del látex por DSC y resistencia a la compresión de probetas tierra-látex, dieron pie en la formulación de los lotes correspondientes a las pruebas exploratorias con el fin de mejorar la calidad del látex y tener un mayor resistencia a la compresión de las probetas.

En una escala arbitraria del 1 al 10, podemos concluir que los látex serie L y M tienen una calificación reprobatoria, ya que las probetas conformadas por estos látex al 1% presentan ruptura al realizar pruebas de compresión; mientras la serie K no presenta ruptura de ninguna probeta a en los 3 niveles de porcentaje de látex, se le podría dar calificación de 7; con respecto a los látex reformulados, obtiene una calificación de 9 ya que la estrategia de adición de MAA influye en la resistencia a la compresión.

En general, se concluye que efectivamente se puede desarrollar un copolímero vinil-acrílico del tipo núcleo-coraza sin problemas de coagulación, generación de grumo o incrustación con el fin de estabilizar un suelo. Mediante la polimerización en emulsión, en un proceso semi-continuo. De acuerdo con los resultados de compresión y caracterización de látex, el material polimérico que exhibe el mejor desempeño como consolidante de suelo es aquel resultante de la formulación de las pruebas exploratorias, denominado K3 MAA+BA, el cual tiene las siguientes características de formulación y dándole una calificación de 10:

<b>Característica</b>	<b>Observación</b>
VAM	65 phm, 12% Semilla
BA	35 phm, 8% Semilla
MAA	1 phm, adición preemulsión @180 min.
Surfacpol EL30	4 phm, 60% semilla
Disponil FES993	1.1 phm
KPS	1 phm
Hidrosulfito AWC	0.1 phm @45°C, Final de Reacción.

**Tabla 5.3** Características del látex con el mejor desempeño en las pruebas de compresión.

### 5.3 Recomendaciones.

Una de las más importantes recomendaciones sobre el proceso, es tener un flujo de alimentación más lenta y controlada de la preemulsión, ya que en el presente trabajo como se observa en la gráficas de cinética de polimerización se tiene una alta inundación en el seno de reacción.

---

Lo anterior se puede lograr con la ayuda de equipos en instrumentos especiales para dicha tarea, equipos que no cuenta el laboratorio D-324.

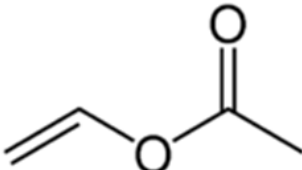
Sobre el diseño de experimento y formulación, cabría realizar más pruebas con una distinta cantidad de emulsificante y realizar diferentes relaciones de monómero en semilla y preemulsión.

Por último, con respecto a las pruebas de estabilización de tierra, se recomienda elaborar diversas pruebas que confirmen que el material previamente sintetizado es apto para una buena estabilización de un suelo.

Para una mayor facilidad y cercanía las pruebas de compresión se realizaron en la máquina para esfuerzo de arenas del laboratorio de Ingeniería Metalúrgica de la Facultad de Química, pero sería más recomendable elaborar estas pruebas de compresión en una máquina que tenga una rapidez de compresión uniforme y programable, y así, observar una fragmentación tener un valor real sobre la presión soportada por cada probeta.




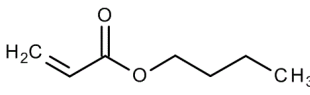
## ANEXO I. Hojas de Seguridad

<b>VAM</b>	
<b>ACETATO DE VINILO</b>	
<b>Fórmula Química</b>	
<b>C<sub>4</sub>H<sub>6</sub>O<sub>2</sub></b>	

Peso Molecular (g/mol)	86.09 g/mol
Densidad @ 25 °C	0.934 g/mL
Punto de Ebullición.	72 °C
Punto de Fusión.	-92°C
Límite Sup. de Explosividad	13.4%
Límite Inf. de Explosividad	2.6%
Temperatura de Autoignición	427 °C
Aspecto	Líquido Incoloro, Olor característico.

Peligros OSHA	Líquido Inflamable, Carcinógeno, Irritante
---------------	--------------------------------------------

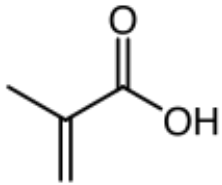
	<b>No. CAS</b> <b>108-05-4</b>
------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------

<b>BA</b>	
<b>ACRILATO DE BUTILO</b>	
<b>Fórmula Química</b>	
<b>C<sub>7</sub>H<sub>12</sub>O<sub>2</sub></b>	

Peso Molecular (g/mol)	128.17 g/mol
Densidad @ 25 °C	0.894 g/mL
Punto de Ebullición.	145 °C
Punto de Fusión.	-64°C
Límite Sup. de Explosividad	9.9%
Límite Inf. de Explosividad	1.3%
Temperatura de Autoignición	293 °C
Aspecto	Líquido Incoloro, Olor característico.


Peligros OSHA	Inflamable, Adsorción cutánea, Irritante.
---------------	-------------------------------------------

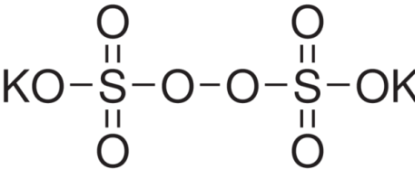
	<b>No. CAS</b> <b>141-32-2</b>
-------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------

<b>MAA</b>	
<b>ÁCIDO METACRÍLICO</b>	
<b>Fórmula Química</b>	
C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	

Peso Molecular (g/mol)	86.09 g/mol
Densidad @ 25 °C	1.015 g/mL
Punto de Ebullición.	163 °C
Punto de Fusión.	14°C
Límite Sup. de Explosividad	8.7%
Límite Inf. de Explosividad	1.6%
Temperatura de Autoignició	400 °C
Aspecto	Líquido Incoloro, Olor característico.


Peligros OSHA Corrosivo, Tóxico, Irritante, combustible Sólido

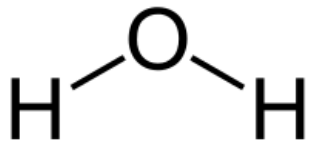
	<b>No. CAS</b>
	<b>79-41-4</b>

<b>KPS</b>	
<b>PERSULFATO DE POTASIO</b>	
<b>Fórmula Química</b>	
K <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	

Peso Molecular (g/mol)	270.32 g/mol
Densidad @ 25 °C	2.47 g/mL
Punto de Fusión.	100 °C
Sulubilidad en Agua	4.45 g/100mL
Límite Sup. de Explosividad	NA
Límite Inf. de Explosividad	NA
Temperatura de Autoignició	NA
Aspecto	Sólido Blanco, Sin Olor


Peligros OSHA Tóxico, Irritante, Alergia en piel y tracto digesti

	<b>No. CAS</b>
	<b>7727-21-1</b>

<b>W</b>	
<b>AGUA</b>	
<b>Fórmula Química</b>	
<b>H<sub>2</sub>O</b>	

Peso Molecular (g/mol)	18 g/mol
Densidad @ 25 °C	1.00 g/mL
Punto de Fusión.	0 °C
Punto de Ebullición.	100 °C
Límite Sup. de Explosividad	NA
Límite Inf. de Explosividad	NA
Temperatura de Autoignición	NA
Aspecto	Líquido Transparente Sin Olor



Peligros OSHA	No tóxico, No irritante.
---------------	--------------------------

	<b>No. CAS</b> <b>7732-18-5</b>
------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------

<b>Disponil® FES 993</b>	<i>Alcohol laurico con 12 moles de OE sulfato de sodio en soln. Acuosa</i>
--------------------------	----------------------------------------------------------------------------



Peso Molecular (g/mol)	N.D.
Densidad	1.1 g/mL
Punto de Ebullición.	92 °C
Punto de Fusión.	0°C
Activo	28 - 30%
pH	7.0 - 8.5
Temperatura de Ignición	>200 °C
Aspecto	Líquido incoloro, olor poco perceptible

Clasificación CRETIB	No Peligroso
----------------------	--------------

		<b>No. CAS</b> <b>9004-82-4</b>
-------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------

<b>Surfacpol® EL 30</b>	<i>Alcohol laurico con 30 moles de Óxido de Etileno</i>
-------------------------	---------------------------------------------------------

Peso Molecular (g/mol)	N.D.
Cont. Max. De Agua	0.50%
Punto de Ebullición.	130 °C
Punto de Fusión.	0°C
Activo	100.0%
pH al 3% en agua	8.5
Temperatura de Ignición	>200 °C
Aspecto	Pellets sólido blanco

Clasificación RETIB	No Peligroso	
		No. CAS
		68439-50-9

---

## BIBLIOGRAFÍA.

1. ADAMSON, Arthur W., "Physical Chemistry of Surfaaces", 6th ed,Wiley & Sons, 1997.
2. ASTM, "American Society of Testing and Materials", Norma ASTM D-2497
3. ASTM, "American Society of Testing and Materials", Norma ASTM D-3282
4. ASTM, "American Society of Testing and Materials", Norma ASTM D-4609
5. BUENTELLO M., Rodrigo. "Látex para estabilización de suelos I: Terpolímero acetato de vinilo, acrilato de metilo y metilmetacrilato. Efecto de la composición y la carboxilación.", Tesis de Licenciatura, Facultad de Química, UNAM. 2010
6. CARRAHER, Charles E., "Introducción a la Química de Polímeros", Reverté ed. S.A.,2002.
7. CHERNOVETZKY, "Memorias del simposio realizado en junio del 2002: Geosintéticos, geotextiles y geomembranas" México, 2002.
8. D. C. Blackley, "Emulsion polymerization". Applied Science. London – England 1975
9. JOHN A. Nairn. "Polymer Characterization". Materials Science and Engineering. 2003
10. LENZ, R. W., "Organic chemistry of synthetic high polymers", Editorial John Wiley Interscience, New York, 1968.
11. LOVELL Peter A., El-Aasser Mohamed S. , "Emulsion polymerization and Emulsion polymers". Wiley Ed. New York 1997
12. MALVERN Info. "Dynamic Light Scattering: Common terms defined", Malvern Instruments Worlwide. pp. 3-4. 2011

- 
13. METCALF J.B. "Soil Stabilization: Principles and Practice" Butterworths, 1972
  14. ODIAN, G., Principles of polymerization, 4ª edición, Editorial John Wiley Interscience, New York, 2004.
  15. OLVERA G., Sergio. "Latex para estabilización de suelo III, Terpolímero acetato de vinilo, metil metacrilato, acrilato de Butilo carboxilado con ácido Metacrílico, efecto del entrecruzamiento.", Tesis de Licenciatura, Facultad de Química, UNAM. 2010
  16. RAY, H.W. y LAURENCE, R.L., Polymerization Reaction Engineering, Wiley Interscience New York, 1975.
  17. ROSEN J. Milton "Surfactant and Interfacial Phenomena" 4th Ed. John Wiley & Sons. New York.
  18. SPERLING, L.H., Introduction To Physical Polymer Science, 4ª edición, Editorial John Wiley Interscience, New Jersey, 2006, p. 1-63.
  19. STEVENS, Malcolm P., Polymer chemistry: an introduction, 3ª edición, Editorial Oxford University Press, USA 1998, p. 15.
  20. SYNDICANT DES FABRICANS D'ÉMULSIONS, "Les Émulsions de Bitume", Champs-Élysées, Paris. 1966.
  21. TELLO M.,. Hector Manuel. "Síntesis y caracterización de un copolímero acrilato de butilo - acrilamida en emulsión : estudio de variables que favorecen la incorporación de la acrilamida." Tesis de Licenciatura Facultad de Estudios superiores Zaragoza, UNAM. 2001