

OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE PERLAS DE POLIESTIRENO
MAGNÉTICO MEDIANTE POLIMERIZACIÓN EN SUSPENSIÓN

HÉCTOR ANTONIO MORA GARCÍA
MILENA DEL PILAR QUIROGA HERNÁNDEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2005

OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE PERLAS DE POLIESTIRENO
MAGNÉTICO MEDIANTE POLIMERIZACIÓN EN SUSPENSIÓN

HÉCTOR ANTONIO MORA GARCÍA
MILENA DEL PILAR QUIROGA HERNÁNDEZ

Tesis presentada como requisito para obtener el título
de Ingeniero Químico.

Director
Ph D. Ramiro Augusto Salazar La Rotta

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2005

DEDICATORIA

A Dios, por ser luz en mi camino y permitirme realizar todos mis sueños hoy y siempre.

A mi familia, por estar siempre a mi lado, aún en el sacrificio de la distancia porque gracias a ellos soy lo que soy.

A mis amigos, por compartir los momentos importantes y ser mi apoyo cercano.

Milena del Pilar

DEDICATORIA

A mi familia y a mis amigos.

Héctor Antonio Mora García

AGRADECIMIENTOS

Al Doctor Ramiro Salazar La Rotta,
Al Doctor Edgar Fernando Castillo,
Al Ingeniero Guillermo Acero,
Y los técnicos del Laboratorio de Operaciones Unitarias Eduardo y Wilson.

Milena y Héctor.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. FUNDAMENTO TEÓRICO	3
1.1.1 ESTIRENO	3
1.2 POLIESTIRENO	3
1.2.1 Mecanismo de reacción	4
1.3 TÉCNICAS DE POLIMERIZACIÓN	5
1.3.1 Polimerización en masa	5
1.3.2. Polimerización en solución	5
1.3.3. Polimerización en emulsión	5
1.3.4 Polimerización en suspensión	5
1.4 CLASES DE POLIESTIRENO	5
1.4.1 Poliestireno expandido (EPS)	6
1.4.2 Poliestireno expandible con agua como agente expansor (WEPS)	7
1.5 RECICLADO DEL POLIESTIRENO EXPANDIDO	8
1.5.1 Reciclado mecánico	9
1.5.2 Recuperación energética	9
1.5.3 Vertido	9
1.6 FERRITAS	9
1.7 PREPARACIÓN DE PERLAS DE POLIESTIRENO MAGNÉTICO	10
1.8 PROPIEDADES DEL POLIESTIRENO MAGNÉTICO	10
1.8.1 Pruebas y técnicas físicas	10
1.8.2 Técnicas fisicoquímicas	11
1.8.3 Pruebas magnéticas	11

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL	12
2.1 SELECCIÓN DE MATERIAS PRIMAS	12
2.1.1 Estireno	12
2.1.2 Reciclado de poliestireno expandido	13
2.1.3 Iniciadores	13
2.1.4 Agente emulsificante	13
2.1.5 Agente de suspensión	13
2.1.6 Ferrita	13
2.2 FORMULACIONES	14
2.2.1 Polimerización del estireno	14
2.2.2 Obtención de perlas de poliestireno que contienen ferrita	17
2.2.3 Obtención de perlas de poliestireno que contienen agua y ferrita	18
2.2.4 Macro-expansión de perlas de poliestireno	19
2.3 CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DE PROPIEDADES	20
2.3.1 Pruebas físicas	20
2.3.2 Pruebas fisicoquímicas	20
2.3.3 Pruebas magnéticas	21
3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	22
3.1 SELECCIÓN DE MATERIA PRIMA	22
3.1.1 Reciclado de poliestireno	22
3.1.2 Iniciadores	24
3.1.3 Materia prima	24
3.2 OBTENCIÓN DE PERLAS DE POLIESTIRENO	24
3.2.1 Prepolimerización	24
3.2.2 Polimerización en suspensión	25
3.2.3 Obtención de perlas de poliestireno que contienen agua	27
3.2.4 Obtención de perlas de poliestireno que contienen ferrita	27
3.2.5 Obtención de perlas de poliestireno que contienen agua y ferrita	29
3.3 MACRO-EXPANSIÓN DE PERLAS DE POLIESTIRENO	30
3.4 CARACTERIZACIÓN	32

3.4.1 Pruebas físicas	32
3.4.2 Pruebas fisicoquímicas	35
3.4.3 Pruebas magnéticas	36
3.5 APLICACIONES	38
4. CONCLUSIONES	39
5. RECOMENDACIONES	40
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
BIBLIOGRAFÍA	43
ANEXOS	46

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Formulaciones para obtención de perlas de poliestireno	15
Tabla 2. Formulaciones para obtención de perlas de poliestireno que contienen agua	17
Tabla 3. Formulaciones para obtención de perlas de poliestireno que contienen ferrita	18
Tabla 4. Formulaciones para obtención de perlas de poliestireno que contienen agua y ferrita	18
Tabla 5. Comparación de la composición inicial y final de agua y ferrita en las PPSM	29
Tabla 6. Variación de la densidad de las perlas debido a la expansión	31

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Estructura Química del Estireno	3
Figura 2. Reacción del estireno para producir el poliestireno	4
Figura 3. EPS comercial en perlas de forma esférica (icopor)	6
Figura 4. Representación esquemática del proceso de la preparación de WEPS	8
Figura 5. Diagrama de flujo de la metodología de la parte experimental	12
Figura 6. Reactor de polimerización	15
Figura 7. Montaje para la prepolimerización	16
Figura 8. Montaje para la macro-expansión de perlas de poliestireno	19
Figura 9. Estereoscopio Cole-Parmer	20
Figura 10. Densidad vs. Porcentaje en peso de mezcla PS-S	22
Figura 11. Viscosidad vs. Porcentaje en peso de mezcla PS-S	23
Figura 12. Perlas de poliestireno (PPS) obtenidas de acuerdo a las formulaciones de la Tabla 1.	26
Figura 13. Perlas de poliestireno que contienen ferrita (PPSM) obtenidas de acuerdo a las formulaciones de la Tabla 3	28
Figura 14. Distribución de tamaño de las perlas para la formulación F14	30
Figura 15. Resultado de la macro-expansión: perlas de poliestireno que contienen agua (izquierda) y perlas de poliestireno que contienen agua y ferrita (derecha)	30
Figura 16. Densidad vs. Porcentaje de ferrita	32
Figura 17. Tamaño de las perlas vistas a través de un estereoscopio, obtenidas mediante diferentes formulaciones (F14, F15 y F9)	33
Figura 18. Corte transversal de las perlas macro-expandidas de acuerdo a las formulaciones F9 y F11 de la Tabla 3	34

Figura 19. Aglomerado de perlas de PSMME obtenidas mediante la formulación F11 de la Tabla 3	35
Figura 20. Prueba de atracción de las perlas con un imán de neodimio	37
Figura 21. Recolección de derrames de crudo	38

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Comportamiento químico del EPS	47
Anexo B. Difractograma de una muestra de la carga magnética de relleno (Ferrita)	48
Anexo C. Costos de materias primas	49
Anexo D. Análisis termogravimétrico de la formulación F9 en un rango de temperatura de 30°C a 180°C (máximo contenido de agua)	50
Anexo E. Análisis termogravimétrico de la formulación F16 (máximo contenido de ferrita)	51
Anexo F. Análisis termogravimétrico de la formulación F9	52
Anexo G. Diagrama del análisis térmico gravimétrico para la formulación F14	53
Anexo H. Diagrama del análisis térmico gravimétrico para la formulación F15	54
Anexo I. Comparación de los diagramas de calorimetría diferencial	55
Anexo J. Diagrama de calorimetría diferencial para la formulación F2	56
Anexo K. Diagrama de calorimetría diferencial para la formulación F15	57
Anexo L. Diagrama de calorimetría diferencial para la formulación F15 después de eliminar la historia térmica	58

RESUMEN

TÍTULO: OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE PERLAS DE POLIESTIRENO MAGNÉTICO MEDIANTE POLIMERIZACIÓN EN SUSPENSIÓN.*

AUTORES: HÉCTOR ANTONIO MORA GARCÍA
MILENA DEL PILAR QUIROGA HERNÁNDEZ**

PALABRAS CLAVES: Polimerización en suspensión, perlas de poliestireno magnético.

DESCRIPCIÓN:

Se prepararon perlas de poliestireno magnético usando la técnica de polimerización en suspensión. En este proceso, la etapa de pre-polimerización se realizó para llevar a cabo la incorporación de la ferrita y el agua en la mezcla inicial. En la etapa posterior de polimerización, la fase acuosa consistió en una solución de hidróxido de etil celulosa (HEC).

Las perlas poliméricas preparadas bajo distintas condiciones experimentales, se caracterizaron mediante microscopía óptica, análisis termogravimétrico (TGA), calorimetría diferencial (DSC) y pruebas de inducción remanente y atracción magnética. Las fotos de microscopía muestran que las partículas obtenidas tienen forma esférica, superficie lisa y una amplia distribución de tamaños de partícula, desde 0,125 hasta 2,5 mm, dependiendo de las condiciones experimentales empleadas. El comportamiento térmico demostró que el mayor contenido de agua y ferrita fueron 23,4% y 12,7% en peso, respectivamente. Las pruebas de magnetización permiten apreciar el comportamiento súper paramagnético de las muestras.

A partir de las mismas fue posible vislumbrar la aplicación de las perlas en la recolección de derrames de crudo, mediante la dispersión de éstas en agua o tierra, dependiendo de la necesidad. De igual manera se plantea la utilización de estas esferas poliméricas magnéticas en la separación de células u otros objetos biológicos, demostrando el avance de esta nueva área de investigación en la ciencia de los materiales.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química.

Director: PhD. Ramiro Salazar La Rotta

ABSTRACT

TITLE: OBTAINING AND CHARACTERIZATION OF MAGNETIC POLYSTYRENE BEADS BY SUSPENSION POLYMERIZATION

AUTHORS: HÉCTOR ANTONIO MORA GARCÍA
MILENA DEL PILAR QUIROGA HERNÁNDEZ**

KEY WORDS: Suspensión polymerization, polystyrene beads.

DESCRIPTION:

Polystyrene magnétic vedas were prepared using the suspension polymerization technique. In this process, the first polymerization stage was realized in spite of making the ferrite and water inside the initial mixture. In next stage the oil phase consisted in a solution of hidroxi ethyl cellulose (HEC).

The polymeric beads prepared under different experimental conditions were characterized by optic microcopy, gravimetric thermal analysis (TGA), Differential Scanning Calorimetry and magnetic attraction and remnant induction proves. The particles obtained exhibit spherical shape and a wide size distribution, ranging from 0,125 up to 2,5 mm as shown by the microscopy photographs. The thermal behavior shows the most content of water and ferrite were 23,4% y 12,7% in weight, respectively. The superparamagnetic behavior of samples was inferred from the magnetization proves.

Starring from them was possible beginning to see bead's application in gathering of mineral oil overflow, by means of dispersion in water or land, ti depends on needs. In the same way, it introduces the use of this polymeric magnetic beads in cell separation, showing this new investigation area advances in materials science.

* Degree Project

** Faculty of Physical-Chemical Engineering, Chemical Engineering School.

Advisor: PhD. Ramiro Salazar La Rotta

LISTA DE ABREVIATURAS

CFCs: compuestos clorofluorocarbonados

DSC: Análisis Calorimétrico Diferencial

EPS: poliestireno expandido

G: Gauss

GPPS: poliestireno de uso general o poliestireno cristal

HEC: hidroxietil celulosa

HIPS: poliestireno de alto impacto

MEC: metil etil cetona

plg: pulgadas

PPSMME: perlas de poliestireno magnético macro-expandido

PSME: poliestireno macro-expandido

PSMME: poliestireno magnético macro-expandido

PPS: perlas de poliestireno

ppm: partes por millón

PPSM: perlas de poliestireno magnético

PS: poliestireno

psi: libra fuerza/pulgada cuadrada

PS-S: mezcla de poliestireno-estireno

rpm: revoluciones por minuto

T: Tesla

TBC: tert-butil catecol

TBP: tert-butil perbenzoato

TGA: Análisis Térmogravimétrico

WEPS: poliestireno expandible con agua

GLOSARIO

Agente de suspensión: sustancia que evita el colapso de las burbujas de monómero durante la polimerización en suspensión con agua. Conocido también como estabilizante de la suspensión.

Agente emulsificante: denominado surfactante. Está compuesto de una cadena carbonada aniónica, hidrofílica o hidrofóbica. Cuando se añade al agua la parte hidrofóbica del surfactante se conecta en agregados o micelas.

Dispersión: distribución de materias líquidas o sólidas. Sistema de dos o más sustancias, en el que una de ellas se encuentra dentro de la otra en un estado de división más o menos fino.

Emulsión: sistema disperso líquido-líquido, en el que una sustancia está distribuída en la otra en forma de pequeñas gotitas.

Suspensión: sistema disperso sólido-líquido, en el que la parte dispersa consta de pequeñas partículas sólidas.

Ferrofluido: dispersiones coloidales de ferro o ferri partículas en un solvente no magnético.

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de nuevos materiales capaces de satisfacer múltiples funciones, basadas en propiedades magnéticas, ha supuesto un gran impulso en el desarrollo de una nueva área de investigación dentro de la ciencia de los materiales. La utilización de materias primas de tipo industrial y reciclado, supone de antemano unos costos reducidos en producción, siendo más competitivos económica y ambientalmente.

Las perlas de poliestireno magnético (PPSM) resultan de gran utilidad en la separación y aislamiento de células y otros objetos biológicos, ya que pueden disminuir considerablemente el tiempo de la separación y a su vez ser aisladas fácilmente aplicando un campo magnético externo. Estas partículas son en realidad súper paramagnéticas, es decir, ellas responden a un campo magnético, pero no son imanes en sí mismas.

A las PPSM se les pueden asociar ligandos o grupos funcionales que les confieren las propiedades efectivas para un acoplamiento específico, permitiendo una rápida, simple y eficiente separación de objetos biológicos, incluso a gran escala. De esta forma, las perlas magnéticas han sido empleadas también en el inmunoensayo, la inmunodiagnos, la cromatografía de afinidad, la fagocitosis, el marcaje y la quimioterapia en sitios específicos. Tanto las células de animales y de plantas pueden ser separadas mediante el uso de éstas esferas [1].

En la literatura existen numerosas referencias que reportan la obtención de PPSM, mediante técnicas de polimerización en emulsión, ya sea por la polimerización en emulsión del estireno en presencia de un ferrofluido [2] o mediante la obtención de partículas de poliestireno porosas que posteriormente se cargan con partículas

de magnetita “*in situ*” [3]. Con esta última variante, Ugelstad obtiene partículas magnéticas de poliestireno que presentan una distribución de tamaños muy uniforme. Sin embargo, para muchas aplicaciones donde no es requisito indispensable la uniformidad de tamaños de las partículas, es posible diseñar métodos más sencillos para la obtención de micro partículas de poliestireno magnéticas.

La adición de la propiedad magnética a las perlas de poliestireno (PPS), consiste en realizar una mezcla física entre los componentes tradicionales para la obtención del polímero y el material magnético particulado hasta en un 12,7 % en peso (ferritas de estroncio y de bario), mediante una polimerización en masa, previa a la polimerización en suspensión. Para suspender la ferrita se dispone de mezclas de poliestireno-estireno (PS-S), hasta en un 30% en peso de poliestireno expandido (EPS) reciclado.

Para incorporar el agua como agente expansor en las perlas de poliestireno se hace una emulsión de ésta en la mezcla inicial PS-S. Al expandir estas perlas se obtiene el poliestireno macro-expandido (PSME) y si las perlas contienen ferrita, se obtiene el poliestireno magnético macro-expandido (PSMME).

El PSMME utilizando agua como agente expansor es un material novedoso que no ha sido reportado en la literatura y su desarrollo podría tener un impacto positivo desde el punto de vista ambiental y económico. Esto debido a que actualmente, como agentes expansores a nivel industrial, se utilizan sustancias orgánicas, que presentan problemas de contaminación ambiental. El solvente más utilizado es el pentano, que sustituyéndolo por agua presentaría una opción aceptable. Además, si se agrega la propiedad magnética para facilitar su reciclado, se tendría un material altamente competitivo, especialmente por sus propiedades (magnéticas, baja densidad, bajo peso, bajo costo y relativamente inerte al ataque químico).

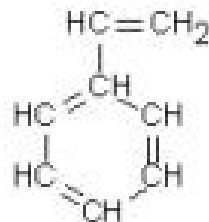
1. FUNDAMENTO TEÓRICO

1.1 Estireno

Este monómero es un hidrocarburo aromático no saturado, obtenido a partir del petróleo por la reacción de síntesis orgánica entre el etileno y el benceno. Es un líquido incoloro con olor característico, soluble en alcohol etílico, y disulfuro de carbono e insoluble en agua. Polimeriza espontáneamente por lo que debe almacenarse a temperaturas inferiores a 23°C y mantener una concentración mínima de tert-butil catecol (TBC) de 10 ppm [4].

El monómero de estireno es un líquido de baja viscosidad que tiene la siguiente estructura química:

Figura 1. Estructura Química del Estireno



1.2 POLIESTIRENO

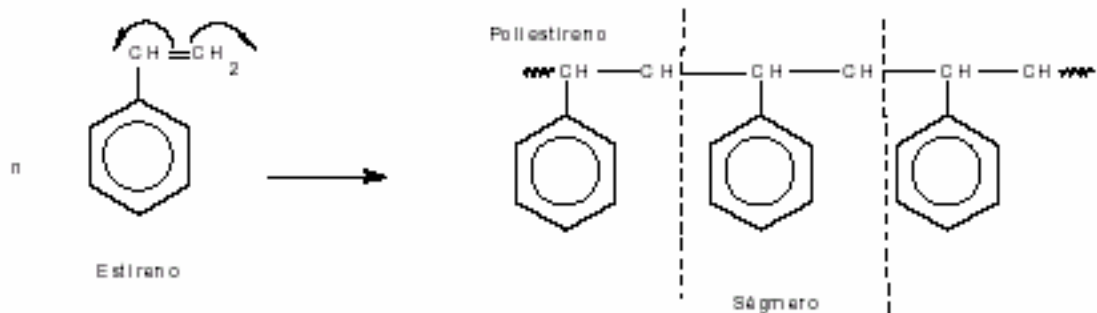
Es un polímero lineal, siendo un producto comercial atáctico y por tanto amorfo. Puede producirse poliestireno (PS) isotáctico pero ofrece pocas ventajas en sus propiedades, excepto entre la transición vítrea (alrededor de 100°C) y su punto de fusión cristalino (alrededor de 240°C), donde es muy similar a otros plásticos cristalinos.

Como la mayoría de los polímeros, el PS es relativamente inerte al ataque químico. Es bastante resistente a los álcalis, haluros de ácidos, a los agentes oxidantes y reductores como se puede ver en el Anexo A. El PS se convierte a temperaturas elevadas en una mezcla de compuestos de bajo peso molecular, siendo aproximadamente la mitad de ellos estireno. El olor característico del monómero sirve de identificación para el polímero. Por otro lado, el EPS es fácilmente atacado por una gran variedad de disolventes, incluidos los agentes de limpieza en seco. Su estabilidad al envejecimiento atmosférico es mala; al ser expuesto, se vuelve amarillo y se cuartea [5].

1.2.1 Mecanismo de reacción. El mecanismo de reacción del PS se da por la polimerización en cadena de radicales libres, para lo cual es necesario un iniciador que genere gran cantidad de radicales a la temperatura de operación [6].

La polimerización del estireno ocurre a través del enlace $-\text{CH}=\text{CH}_2$ formando moléculas no cristalinas, con cientos o miles de unidades estructurales y pesos moleculares de varios cientos de miles hasta millones, para dar como resultado final el PS, como se puede observar en la Figura 2.

Figura 2. Reacción del estireno para producir el poliestireno



1.3 TÉCNICAS DE POLIMERIZACION

1.3.1 Polimerización en masa. Si se hace reaccionar el monómero puro, añadiendo solo catalizadores, la polimerización es en masa. El polímero se obtiene “en bloque”, no como polvo ni grano, y no es necesario un proceso de separación adicional [7].

1.3.2 Polimerización en solución. Cuando no se desean materiales sólidos sino soluciones poliméricas, se hace la polimerización añadiendo un disolvente que diluya el monómero. Si el disolvente es soluble en el monómero, pero no en el producto de la polimerización, el polímero precipita al formarse a modo de polvo fino y puede aislarse una vez secado.

1.3.3 Polimerización en emulsión. Es la polimerización del monómero finamente dividido, emulsionado en agua o en otro líquido dispersante. Los polímeros obtenidos en emulsión son pulverulentos, con tamaño de grano inferior a 0,04 mm y suelen contener restos del emulsionante que influyen sobre las propiedades, especialmente aumentando el poder de absorción de agua.

1.3.4 Polimerización en suspensión. Consiste en distribuir en agua el monómero ya mezclado y el catalizador, agregando o no, un estabilizador de la suspensión y agitando mecánicamente, iniciando así la reacción. En este procedimiento, el polímero precipita en forma de pequeñas perlas que se separan por tamizado.

1.4 CLASES DE POLIESTIRENO

Se distinguen varios tipos de PS con propiedades diferentes que permiten a su vez la producción de una diversidad de artículos para usos variados.

Existen dos tipos básicos de poliestireno:

- Poliestireno de uso general o Poliestireno cristal (GPPS).
- Poliestireno de alto impacto (HIPS).

A partir del poliestireno de uso general se obtienen otras variedades de PS como el expandido (EPS) [8].

1.4.1 Poliestireno expandido (EPS). Este material, más conocido como “icopor”, “corcho blanco”, “poliespan” o “porexpan” (véase Figura 3), es un material plástico celular, generalmente de color blanco, compuesto esencialmente de aire (hasta un 98%) y se utiliza, por un lado en la construcción como aislante térmico y acústico y como material de aligeramiento de estructuras diversas; por otro lado, para el envasado y embalado de diversos productos y mercancías, además de multitud de aplicaciones diversas desde los cascos de ciclistas y motoristas, así como de envases especiales para el transporte de órganos destinados al transplante [9].

Figura 3. EPS comercial en perlas de forma esférica (icopor)



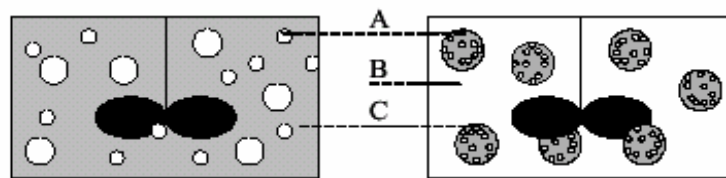
En el proceso de expansión del EPS, el agente expansor, que generalmente es pentano, está dispersado en la matriz de PS y sufre una expansión al cambiar de fase debido a un aumento de la temperatura. El PS que rodea a cada una de las micelas de pentano no lo deja salir fácilmente y en cambio sufre un aumento de volumen para compensar la presión interna del gas formado, lo que conlleva a que se formen las celdas en la matriz del EPS, cuyo tamaño es de alrededor de 0,2 a 2 micrómetros. Este proceso debe llevarse a cabo a una temperatura que permita el proceso expansivo, que debe ser mayor que la temperatura de transición vítrea del PS que contiene el agente expansor.

Para lograr una micro-expansión o una macro-expansión a nivel de celda, la diferencia radica principalmente en la distribución de tamaño de las gotitas de agente expansor en la emulsión. De acuerdo al tamaño existen micro-emulsiones y macro-emulsiones. Cuando la solubilidad del agente expansor se da a nivel micelar se puede lograr la micro-expansión, que es la que ocurre cuando se obtiene el EPS. Para lograr la macro-expansión del PS es necesario partir de una macro-emulsión, donde las gotitas del agente expansor en la emulsión son relativamente grandes (mas de 10 micrómetros). En la literatura aun no se ha reportado la macro-expansión del PS, por lo tanto, cuando se hace referencia al EPS se sobreentiende que se está hablando de un PS micro-expandido, de lo contrario se hará la aclaración.

1.4.2 Poliestireno expandible con agua como agente expansor (WEPS).

Crevecoeur (1996) y su grupo desarrollaron un proceso para incorporar el agua en las primeras fases de la polimerización, estabilizada por la adición de un surfactante adecuado [10]. Con este proceso se obtienen gotas de agua esféricas, en escala de micrómetros, dentro de las perlas de PS. Este procedimiento de polimerización consiste en los siguientes pasos, los cuales se representan en la Figura 4:

Figura 4. Representación esquemática del proceso de la preparación de WEPS. En la pre-polimerización el agua es emulsificada en la mezcla estireno/PS y en la polimerización en suspensión son formadas las perlas de PS que contienen: A. Agua emulsificada. B. Medio de suspensión (el agua). C. Fase orgánica del estireno/PS.



Pre-polimerización Polimerización en suspensión

Primero ocurre la prepolimerización en masa de la mezcla de estireno/agua emulsificada con una conversión de aproximadamente 30%, con el fin de aumentar la viscosidad de la matriz para estabilizar las gotas de agua. Luego se realiza la dispersión de la mezcla prepolimerizada en agua que contiene el estabilizador apropiado de la suspensión. Finalmente se lleva a cabo la polimerización en suspensión por radicales libres para completar la conversión del estireno, produciendo las perlas esféricas de PS que contienen el agua como el único agente expansor.

Las propiedades físicas del agua son diferentes de las de los hidrocarburos utilizados comercialmente como agentes de expansión, el pentano es soluble en poliestireno a elevadas temperaturas, mientras que el agua no lo es; esto requiere una dispersión diferente del agua como agente expansor a través de la matriz del polímero.

1.5 RECICLADO DE EPS

El sistema de recuperación del EPS depende de la naturaleza del residuo generado, es decir, residuos industriales, residuos del comercio y distribución o residuos domésticos [11]. Se pueden considerar tres opciones para el tratamiento de los residuos de EPS.

1.5.1 Reciclado mecánico. El EPS puede reciclarse mecánicamente a través de diferentes formas y para distintas aplicaciones: fabricación de nuevas piezas de EPS, mejora de suelos, incorporación a otros materiales de construcción, producción de granza de PS y como material de relleno.

1.5.2 Recuperación energética. La combustión del EPS en instalaciones de recuperación energética no produce gases dañinos ya que las emisiones se controlan y filtran cuidadosamente. En las modernas plantas de combustión el EPS libera la mayor parte de su contenido energético en forma de calor ayudando a la combustión de otros residuos y emitiendo únicamente dióxido de carbono, vapor de agua y trazas de cenizas no tóxicas. Es importante destacar que el EPS no contiene ningún gas de la familia de los compuestos clorofluorocarbonados (CFCs), ni ningún otro compuesto clorado.

1.5.3 Vertido. El vertido de los residuos de embalajes de EPS es el método de gestión de residuos menos aceptable porque implica perder una oportunidad de recuperar recursos valiosos. Pero cuando no hay otro método de recuperación alternativo y viable, los residuos de EPS pueden destinarse al vertido con total seguridad ya que el material es biológicamente inerte, no tóxico y estable. El EPS no contribuye a la formación de gas metano, con su correspondiente potencial de efecto invernadero, ni tampoco supone ningún riesgo para las aguas subterráneas, por su carácter inerte y estable.

1.6 FERRITAS

Son materiales denominados ferromagnéticos cuya fórmula es $MO(Fe_2O_3)_n$ donde M es un ión de un metal divalente. Son compuestos cerámicos con excelentes propiedades magnéticas que les permiten ser usados como imanes permanentes. La ferrita de bario ($BaFe_{12}O_{19}$) y la ferrita de estroncio ($SrFe_{12}O_{19}$) son los materiales magnéticos más utilizados por su excelente relación calidad/precio. La ferrita está compuesta por una mezcla de óxido de hierro y carbonato de bario o estroncio y se obtiene a través de un proceso de sinterización [12].

1.7 PREPARACION DE PERLAS DE POLIESTIRENO MAGNÉTICO (PPSM)

Actualmente las PPSM se obtienen utilizando técnicas de polimerización en emulsión, ya sea, mediante la polimerización en emulsión del estireno en presencia de un ferrofluido o mediante la obtención de partículas de PS porosas que posteriormente se cargan con partículas de magnetita “in situ” [1].

Los métodos de preparación de PPSM anteriormente mencionados son de elevado costo, debido a que utilizan gran cantidad de solventes y de agentes de emulsión, entre los solventes utilizados se encuentran el diclorometano, líquidos silicorgánicos (siliconas) y en algunos casos metales líquidos. Los ácidos undecanoico, ricinoléico, succínico, derivados del ácido polifosfórico, dodecilamina y algunos polímeros, son utilizados como estabilizantes. Si el método de obtención es por precipitación se necesitan soluciones acuosas de sales de hierro como $FeCl_3$, $FeSO_4$, $FeCl_2$ y/o empleando reacciones termoquímicas de los compuestos de hierro y cobalto, por ejemplo, la descomposición del pentacarbonato de hierro o del tetracarbonato de cobalto [13].

1.8 PROPIEDADES DEL POLIESTIRENO MAGNÉTICO

1.8.1 Pruebas y técnicas físicas

- **Ensayo para determinar la densidad:** se determina por el procedimiento habitual de relación peso/volumen. Este ensayo está descrito en la norma NTC 1397.
- **Microscopía óptica:** la microscopía óptica es una técnica para analizar la estructura de un material; por medio de este análisis se puede observar la organización general de la estructura y la coexistencia de fases, además, permite determinar el tamaño, forma y distribución de varias fases e inclusiones que tienen gran efecto sobre las propiedades mecánicas del material.

1.8.2 Técnicas fisicoquímicas

- **Análisis térmogravimétrico (TGA):** mediante el análisis térmogravimétrico (TGA) se determina la pérdida de peso de una muestra a medida que se aumenta la temperatura, teniendo en cuenta que cada componente de ésta se volatiliza o descompone a una temperatura específica. Con este análisis se determina de forma cuantitativa los niveles de humedad y material de relleno, además de la estabilidad térmica del material. Para el análisis por esta técnica se tuvo en cuenta la norma ASTM E 1131.
- **Análisis Calorimétrico Diferencial (DSC):** por medio del análisis calorimétrico diferencial (DSC) se determina la diferencia de energía en una sustancia con respecto a la sustancia de referencia que es medida como función de la temperatura, mientras que estas muestras están sujetas a un programa de control de temperatura. Para el análisis por esta técnica se tuvo en cuenta la norma ASTM E 537-86.

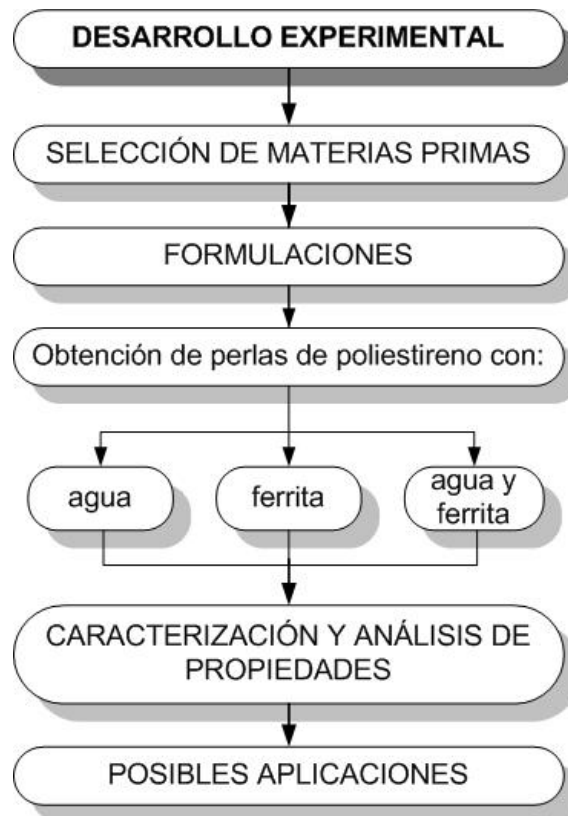
1.8.3 Pruebas magnéticas

- **Ensayo para medir la inducción remanente:** la inducción remanente o remanencia, es la fuerza de imantación que está presente, debido al momento magnético total, o que permanece en un material que ha sido imantado hasta la saturación en un circuito cerrado. Las unidades de medida de la remanencia son Tesla (T) o Gauss (G), los cuales se pueden determinar directamente en un gaussímetro, magnetómetro u osciloscopio ó indirectamente en un fluxómetro.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

La parte experimental se hizo de acuerdo al diagrama de la Figura 5.

Figura 5. Diagrama de flujo de la metodología de la parte experimental.



2.1 SELECCIÓN DE MATERIAS PRIMAS

2.1.1 Estireno. El monómero de tipo comercial utilizado para la polimerización se lava con una solución de NaOH al 10% en peso para eliminar el inhibidor de la fase orgánica Tertbutil Catecol (TBC) y posteriormente, se lava con agua destilada para disminuir el pH. Se almacena a una temperatura de 10°C para evitar la polimerización del mismo.

2.1.2 Reciclado del poliestireno expandido. Debido a la baja densidad del EPS, es necesario disolverlo en un solvente adecuado, puesto que muchos de los líquidos orgánicos lo atacan o destruyen su estructura pero no lo disuelven verdaderamente. Se realizó la prueba con varios disolventes: gasolina, thinner, varsol, pentano, xileno, tolueno y estireno. El estireno disuelve al poliestireno, al igual que el xileno.

2.1.3 Iniciadores. Se utilizaron dos iniciadores: peróxido de metil etil cetona (MEC) junto con el acelerante naftenato de cobalto y tert-butil perbenzoato (TBP). Estos reactivos se deben almacenar a una temperatura inferior a 10°C, para evitar su descomposición.

2.1.4 Agente emulsificante. El lauryl sulfato de sodio, conocido comercialmente como GENAPOL, se empleó para obtener la emulsión inversa del agua en el estireno prepolimerizado.

2.1.5 Agente de suspensión. Se utilizó como agente de suspensión la hidroxietil celulosa (HEC), comercialmente denominada Cellulose. Este es un polímero de bajo peso molecular utilizado extensivamente como coloide protector en la polimerización en emulsión y en suspensión.

2.1.5 Ferrita. Como carga magnética se escogió la ferrita de bario que presenta excelentes propiedades magnéticas, bajo costo y disponibilidad comercial [12].

El material magnético se obtuvo a partir de imanes reciclados de parlantes y altavoces, cuya composición no es cien por ciento ferrita de bario, sino que está mezclado con otros materiales magnéticos como ferrita de estroncio. En el Anexo B se muestra un análisis instrumental de rayos X, previamente realizado, donde se comprobó que un 98% en peso corresponde a una mezcla de ferrita de bario y estroncio.

Con el objeto de reducir el tamaño del material magnético a un diámetro de partícula más pequeño, se realizó la molienda de la ferrita, para facilitar su posterior incorporación a la mezcla polimérica. Esta operación se llevó a cabo en un molino de bolas. Seguidamente se hizo una selección del diámetro de partícula adecuado mediante el tamizado con mallas para la incorporación del material. El tamaño de partícula utilizado para la mezcla es de 0,053 mm (mesh 270 serie Tayler).

Teniendo en cuenta que un ferrofluido que contiene polímero induce una efectiva atracción entre las partículas magnéticas, con una fuerza proporcional a la concentración polimérica y al rango comparable al tamaño del polímero [14]; se suspendió la ferrita en mezclas de PS-S en diferentes fracciones en peso.

2.2 FORMULACIONES

2.2.1 Polimerización del estireno

- **Polimerización en masa:** se probó la polimerización en masa del estireno con los dos iniciadores a temperatura ambiente (30° C), 60° C y 90° C. Para el TBP se usó la relación 0,15 mL por cada 100 mL de monómero y para el MEC peróxido la relación 2 mL por cada 100 mL de monómero.

En la selección del reactor para la polimerización en suspensión, se tuvieron en cuenta tres tipos de reactor: un erlenmeyer de boca ancha de 500 mL, un reactor de polimerización de 1L (ver Figura 6) y un balón de tres bocas de 500 mL (ver Figura 7). En el caso del erlenmeyer se agitó mecánica o magnéticamente sin atmósfera inerte de nitrógeno a una temperatura de 60° C. Para el balón de tres bocas se utilizó agitación mecánica y atmósfera inerte de nitrógeno a 70°C.

Figura 6. Reactor de polimerización. Consta de: 1. Agitador de velocidad variable, 2. Entrada de nitrógeno, 3. Termómetro, 4. Reactor de polimerización, 5. Chaqueta de calentamiento, 6. Cheque para el paso del aceite, 7. Baño termostático de aceite térmico, 8. Control de temperatura, 9. Bomba.



- **Polimerización en suspensión:** la operación se llevó a cabo en el reactor de polimerización a una temperatura de 90°C. Se utilizaron diferentes proporciones de la mezcla PS-S/agua destilada (1:2, 1:3 y 1:8), como se muestra en la Tabla 1. Tomando la formulación F3 se varió la velocidad de agitación para observar la relación existente con el tamaño final de las perlas.

Tabla 1. Formulaciones para obtención de perlas de poliestireno

FORMULACIÓN	MATERIALES					
	MEC (ml)	Estireno (ml)	PS (g)	HEC (g)	Vel. (rpm)	H ₂ O (ml)
F1	5,3	210	100	1,5	800	600
F2	3,5	140	67	1	800	600
F3	1,8	70	34	0,5	800	800
F4	1,8	70	34	0,5	120	800
F5	1,8	70	34	0,5	360	800

- **Obtención de perlas de poliestireno que contienen agua:** para poder incorporar el agua al poliestireno se realizó la emulsificación de ésta en una etapa temprana de la reacción. Se logró mediante una polimerización en masa previa a la polimerización en suspensión que se denominó etapa de prepolimerización.

- **Prepolimerización:** se utilizó el siguiente procedimiento: Se calentó la mezcla de estireno-poliestireno en el balón de tres bocas con una agitación de 800 rpm (véase Figura 7). Cuando alcanzó 60°C se mantuvo a esta temperatura durante el proceso y se adicionaron 2 gotas el naftenato de cobalto (acelerante). Transcurridos cinco minutos se añadieron 1,8 mL de MEC peróxido (iniciador) y se mantuvo en agitación durante quince minutos, tiempo después del cual se incorporó el agua con el GENAPOL (agente emulsificante) en una relación 3:1 permitiendo así, la formación durante los próximos diez minutos de la emulsión inversa. Las relaciones en volumen utilizadas fueron 5, 10, 20 y 30 mL de agua por cada 100 mL de mezcla PS-S.

Figura 7. Montaje para la prepolimerización. Consta de: 1. Agitador de velocidad variable, 2. Termómetro, 3. Entrada de nitrógeno, 4. Balón de tres bocas, 5. Baño de aceite térmico, 6. Manta de calentamiento.



- **Polimerización en suspensión:** el producto de la prepolimerización fue llevado al reactor previamente cargado con 800 mL de agua destilada y 0,5 g de HEC, homogenizado mediante agitación. Para obtener la suspensión se agitó a 360 rpm sin interrupción hasta el final del proceso. La temperatura de reacción fue de 90° C. Esta etapa tuvo una duración de seis horas.

En la Tabla 2 se puede observar con detalle las proporciones de los materiales utilizados.

Tabla 2. Formulaciones para obtención de perlas de poliestireno que contienen agua

FORMULACIÓN	MATERIALES			
	Estireno (ml)	PS (g)	Agua (ml)	GENAPOL (ml)
F6	70	34	5	1,7
F7	70	34	10	3,4
F8	70	34	20	6,7
F9	70	34	30	10

- **Lavado y tamizado:** el producto de la polimerización se lavó con abundante agua para retirar el agente de suspensión. Posteriormente se realizó el tamizado de las perlas utilizando las mallas 42, 60, 80, 115 y 150 de la Serie Tayler.

2.2.2 Obtención de perlas de poliestireno que contienen ferrita. El procedimiento que se siguió fue similar al descrito en la obtención de perlas de poliestireno que contienen agua. Las condiciones de operación (temperatura, tiempo y velocidad de agitación) fueron conservadas; la diferencia radicó en la adición de la ferrita en lugar del agua durante la etapa de prepolimerización.

Las proporciones de ferrita adicionadas se variaron de 0 a 40 g de ferrita por cada 100 mL de mezcla PS-S, como se puede observar en la Tabla 3.

Tabla 3. Formulaciones para obtención de perlas de poliestireno que contienen ferrita

FORMULACIONES	MATERIALES			
	Estireno (ml)	PS (g)	MEC (ml)	Ferrita (g)
F9	70	34	1,8	0
F10	70	34	1,8	5
F11	85	16,7	2,1	10
F12	85	16,7	2,1	20
F13	85	16,7	2,1	30

2.2.3 Obtención de perlas de poliestireno que contienen agua y ferrita. Se modificó el procedimiento de obtención de PPS que contienen agua de la siguiente manera: en la etapa de prepolimerización se adicionó la ferrita transcurridos veinte minutos de la incorporación del agua y se mantuvo en agitación durante quince minutos, antes de llevar la mezcla a la etapa de polimerización en suspensión. Se utilizaron 7,5 mL de agua y 2,5 mL de GENAPOL. El resumen de los parámetros tenidos en cuenta en este procedimiento se puede observar en la Tabla 4.

Tabla 4. Formulaciones para obtención de perlas de poliestireno que contienen agua y ferrita

FORMULACIONES	MATERIALES			
	Estireno (ml)	PS (g)	Agua (ml)	Ferrita (g)
F14	70	34	7,5	5
F15	85	16,7	7,5	10
F16	85	16,7	7,5	20

2.2.4 Macro-expansión de perlas de poliestireno. Con el fin de obtener poliestireno macro-expandido (PSME) se realizó el proceso de expansión en un montaje especialmente diseñado para ello, éste se puede observar en la Figura 8.

Se cargaron 30g de perlas; para expandirlas se inyectó vapor saturado a 140 psi durante 2 minutos, se mantuvo la válvula de salida de condensado abierta. Seguidamente se cerró la válvula de salida de condensado y la entrada de vapor para permitir un equilibrio de presión entre el recipiente de expansión y la cámara, que previamente ha sido llevada a 25 plg de vacío. Después de cinco minutos se abre lentamente la válvula de salida de condensado y se espera a que disminuya la temperatura del recipiente de expansión para retirar el PSME.

Figura 8. Montaje para la macro-expansión de perlas de poliestireno

1. Vacuómetro, 2. Conexión de vacío 3. Cámara de vacío 4. Manómetro 5. Recipiente de expansión 6. Salida de condensado 7. Conexión de vapor



2.3 CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DE PROPIEDADES

2.3.1 Pruebas físicas

- **Ensayo para la determinación de la densidad:** se realizó la medición de la densidad de las perlas de poliestireno por el método de Arquímedes.
- **Microscopía óptica:** con la ayuda del estereoscopio Cole-Parmer CAS PIN 5-3903-00 No.1839, mostrado en la Figura 9, se tomaron fotografías de las perlas obtenidas para la determinación de su apariencia y estructura.

Figura 9. Estereoscopio Cole-Parmer



2.3.2 Pruebas fisicoquímicas

- **Análisis Termo Gravimétrico (TGA):** los ensayos de TGA se realizaron en la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander. Esta prueba se realizó en el analizador termogravimétrico *TA Instruments* modelo *TGA 2050*, para una muestra de perlas de poliestireno que contiene agua (la de mayor porcentaje) y tres muestras de perlas de poliestireno que contienen agua y ferrita. Las muestras se analizaron en cápsulas de platino con un barrido desde una

temperatura de equilibrio de 25°C hasta 600°C, con una velocidad de calentamiento de 10°C/min y en presencia de nitrógeno con flujo de 50 cm³/min.

- **Calorimetría Diferencial (DSC):** se realizaron dos pruebas de calorimetría diferencial (DSC), la primera con poliestireno puro obtenido mediante polimerización en suspensión y la segunda con perlas de poliestireno que contienen agua y ferrita mediante polimerización en suspensión. Estas pruebas se llevaron a cabo en la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander utilizando el equipo DSC-Q10 de la compañía TA INSTRUMENT, teniendo en cuenta los siguientes parámetros: atmósfera de nitrógeno a 50 cm³/min, temperatura inicial de 30°C y se lleva hasta 150°C a 10°C/min.
- **Resistencia química:** se hicieron pruebas cualitativas en las que se utilizaron solventes de tipo industrial tales como gasolina, querosene, varsol, thinner y xileno, con el fin de observar el ataque de éstos a los diferentes tipos de materiales obtenidos.

2.3.3 Pruebas magnéticas

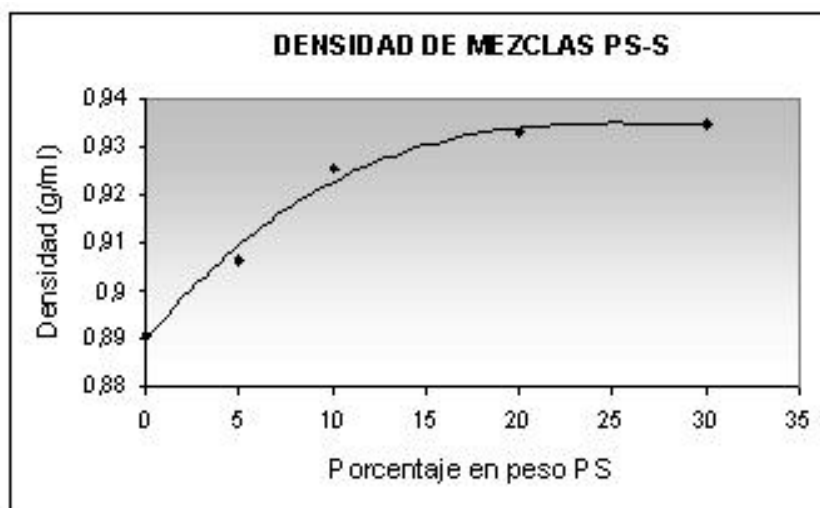
- **Inducción remanente:** se hizo la medición del campo magnético para las perlas de poliestireno que contienen agua y ferrita, utilizando un gaussímetro *FW BELL Modelo 4048*. Estas pruebas se realizaron en el Laboratorio de Control Magnético de Fluidos del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP).
- **Pruebas de atracción:** para esta prueba cualitativa se dispuso de imanes de neodimio y de una espátula de hierro, con el objetivo de verificar la adhesión de las perlas a estos materiales.

3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1 SELECCIÓN DE MATERIA PRIMA

3.1.1 Reciclado del poliestireno. De los solventes utilizados para disolver el PS, sólo se obtuvieron resultados favorables con el xileno y el estireno. El xileno se utilizó para el lavado de los recipientes durante el desarrollo experimental, siendo manejados adecuadamente sus residuos. En el caso del estireno y las mezclas de PS-S preparadas, se observó el comportamiento de la densidad y la viscosidad cinemática con respecto al porcentaje en peso de poliestireno (véase Figuras 10 y 11, respectivamente).

Figura 10. Densidad vs. Porcentaje en peso de mezcla PS-S



En la Figura 10, se observa que la densidad de la mezcla de PS-S aumenta al incrementar el porcentaje en peso de PS. Se encontró una relación polinomial de tercer orden para mezclas de PS-S en un rango de 0 a 30% en peso, dada por la siguiente ecuación:

$$\rho = 0,88934331 + 0,0048424525 X - 0,00016953365 X^2 + 1,9453825 * 10^{-6} X^3$$

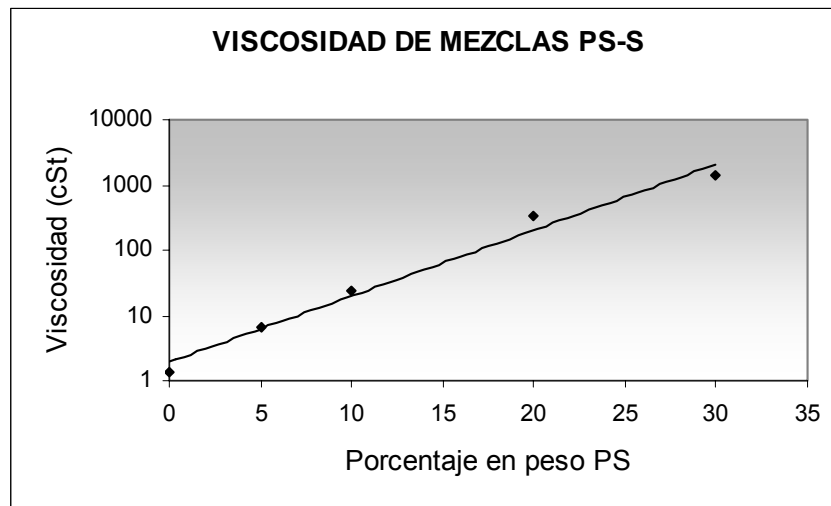
$$R^2 = 0,9932$$

Donde

ρ – Densidad de la mezcla [g/mL]

X – Porcentaje en peso de PS

Figura 11. Viscosidad vs. Porcentaje en peso de mezcla PS-S



En el caso de la viscosidad de la mezcla se observa una relación lineal entre la viscosidad y el porcentaje en peso de PS (0 a 30%), debido a que el eje **y** de la Figura 11 está en escala logarítmica; lo que quiere decir que la ecuación que describe este comportamiento es de tipo exponencial y es la siguiente:

$$\mu = 1,9477 e^{0,2322 X}$$

$$R^2 = 0,9812$$

Donde

μ – Viscosidad cinemática [cSt]

X – Porcentaje en peso de PS

A medida que se disuelve mas PS en el disolvente (S), la viscosidad de la mezcla se incrementa exponencialmente, este es un fenómeno característico de las soluciones poliméricas.

3.1.2 Iniciadores. Para la polimerización en masa del 98% del estireno, a una temperatura de 60°C, el tiempo de polimerización utilizando TBP fue de 6,5 horas; mientras que utilizando el MEC peróxido fue de 7 horas.

Teniendo en cuenta que la diferencia del tiempo de polimerización para cada caso no es significativamente grande, se decidió optar por el más económico y de tipo comercial, el MEC peróxido, utilizando también un acelerante (naftenato de cobalto).

3.1.3 Materia prima. De acuerdo a los análisis anteriores y a lo planteado en el desarrollo experimental, se determinó una lista de materias primas para ser utilizadas en la obtención de perlas de poliestireno (PPS).

- Monómero: Estireno
- Iniciador: MEC peróxido
- Acelerante: Naftenato de Cobalto
- Agente emulsificante: GENAPOL
- Medio de suspensión: Agua destilada
- Agente de suspensión: HEC
- Material magnético: Ferrita
- Agente de expansión: Agua destilada

En el Anexo C se presentan los costos y proveedores.

3.2 OBTENCIÓN DE PERLAS DE POLIESTIRENO

La obtención de las PPS se llevó a cabo en dos fases: prepolimerización y polimerización.

3.2.1 Prepolimerización. Consistió en una polimerización en masa, realizada en el balón de tres bocas, el cual presentó mayor facilidad de manejo para la

incorporación de los materiales de relleno como la ferrita y el agua, así como la posibilidad de hacer la operación en presencia de atmósfera inerte de nitrógeno. La temperatura a la cual se hizo este procedimiento fue 60°C.

3.2.2 Polimerización en suspensión. En las pruebas preliminares se encontró que para la formación de PPS en agua, el aumento de la viscosidad del producto de la prepolimerización es de vital importancia. Para tal fin se dispuso de las mezclas PS-S, se lograron mejores resultados con la mezcla del 30% en peso; reciclando así, una cantidad sustancial de EPS durante el proceso.

Las proporciones utilizadas de acuerdo con la Tabla 1, permitieron observar los siguientes resultados que se pueden apreciar en la Figura 12.

La proporción de la mezcla PS-S:Agua destilada es decisiva en la formación de las perlas de poliestireno. Si la proporción es alta (1:2) como en la formulación F1, se forma un polvo no uniforme. A medida que disminuye esta proporción se empiezan a formar perlas de tamaño microscópico (1 – 5 micrómetros) como es el caso de la formulación F2, aunque se presenta cierta aglomeración. En la formulación F3 se obtienen esferas de mayor tamaño sin aglomeración y con una superficie lisa. Se consideró que la proporción (1:8), correspondiente a la formulación F3, presentó los mejores resultados para realizar las demás variaciones.

Se observó que al disminuir la velocidad de agitación el tamaño de las perlas aumentó. Sin embargo, existe una velocidad mínima de agitación necesaria para que la fase orgánica (mezcla PS-S) forme perlas durante el proceso de polimerización en suspensión. Por debajo de esta velocidad se obtiene un sólido amorfo como el mostrado en la Figura 12 correspondiente a la formulación F4. La velocidad utilizada en la formulación F5 (360 rpm) fue la seleccionada para continuar el desarrollo experimental.

Figura 12. Perlas de poliestireno (PPS) obtenidas de acuerdo a las formulaciones de la Tabla 1.



F1



F2



F3



F4



F5

3.2.3 Obtención de perlas de poliestireno que contienen agua. Para verificar el contenido de agua dentro de las PPS, se realizó un TGA a la formulación F9, con un resultado de 23,4% en peso de agua. En el Anexo D se ve claramente que la curva de Porcentaje en peso vs. Temperatura presenta un cambio de pendiente entre 100°C y 120°C, confirmando la presencia de agua en la perla. El agua al estar atrapada en las celdas, tarda en salir de ellas, para lo cual la pérdida de peso se registra a temperaturas ligeramente mayores al punto de ebullición del agua a la presión atmosférica local.

3.2.4 Obtención de perlas de poliestireno que contienen ferrita. Como se planteó en el desarrollo experimental, la ferrita se incorporó en la etapa de prepolimerización utilizando mezclas de PS-S. Uno de los objetivos de este trabajo era utilizar materiales reciclados, por lo tanto se trató en lo posible de emplear las mezclas con mayor porcentaje de poliestireno para las formulaciones de la Tabla 3. Aunque se presentó una mayor facilidad para la incorporación de la ferrita al aumentar el porcentaje de PS en la mezcla, al realizar la suspensión se tuvieron inconvenientes debido a que la viscosidad se aumentó considerablemente al agregar la ferrita y por ende no se formaron esferas para las formulaciones F11 y F12 con la mezcla del 30% en peso.

Para la formación de las esferas de las formulaciones F11 y F12 fue necesario disminuir la viscosidad de la mezcla PS-S, dando mejores resultados con la mezcla PS-S del 20% en peso.

A pesar de disminuir la viscosidad de la mezcla PS-S, no fue posible la obtención de perlas con más del 12,7% en peso de contenido de ferrita. Esto se puede observar en el termograma mostrado en el Anexo E.

En la Figura 13, se muestran los resultados obtenidos a partir de las formulaciones de la Tabla 3.

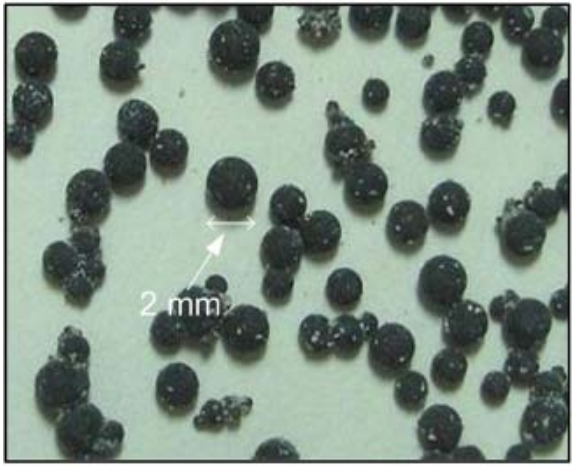
Figura 13. Perlas de poliestireno que contienen ferrita (PPSM) obtenidas de acuerdo a las formulaciones de la Tabla 3.



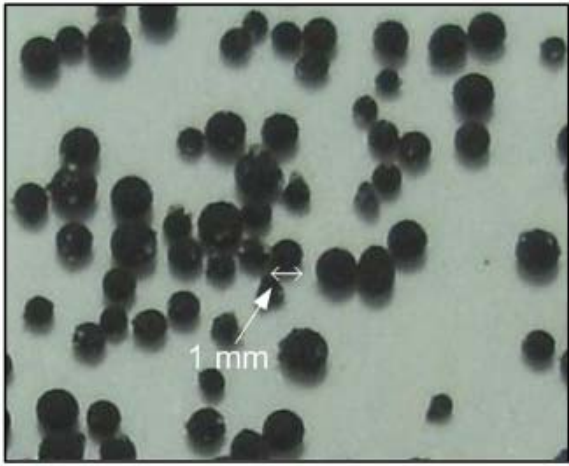
F9



F10



F11



F12



F13

3.2.5 Obtención de perlas de poliestireno que contienen agua y ferrita. Las perlas se obtuvieron de acuerdo a las formulaciones de la Tabla 4. Para comprobar que efectivamente se incorporaron el agua y la ferrita, se realizó el análisis termogravimétrico (TGA) a cada una de las formulaciones (ver Tabla 5).

Tabla 5. Comparación de la composición inicial y final de agua y ferrita en las PPSM.

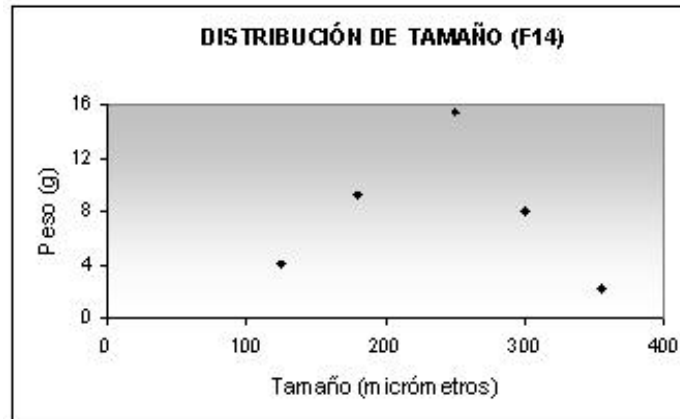
FORMULACIONES	COMPOSICIÓN INICIAL		RESULTADO (TGA)	
	Agua (%peso)	Ferrita (%peso)	Agua (%peso)	Ferrita (%peso)
F14	6,67	4,45	2,67	4,25
F15	6,38	8,51	3,66	7,46
F16	5,88	15,68	3,56	12,74

Según los resultados, la cantidad de ferrita no incorporada en las perlas aumenta al incrementar la cantidad de ferrita inicial. Para la formulación F14 la cantidad no incorporada fue del 4,5% en peso, para la formulación F15 fue del 12,3% en peso y para la formulación F16 fue del 18,8% en peso. Esto se atribuyó al paso de la mezcla de la etapa de prepolimerización a la polimerización en suspensión, debido a que en ese momento se suspendió la agitación y parte de la ferrita tiende a sedimentarse y adherirse al fondo del balón donde permanece en la capa que no logra pasar a la siguiente fase de polimerización.

Por la presencia de la ferrita en la mezcla de poliestireno se limita el porcentaje de agua que puede ser incorporado. En la Tabla 5 se observa que el aumento del porcentaje de ferrita interviene favorablemente, aunque no llega a ser superior al 60% en peso como en el caso de la formulación F16

Para observar la distribución de tamaño de las perlas se realizó un tamizado a una muestra de 39,2 g obtenida de acuerdo a la formulación F14 (Ver Figura 14).

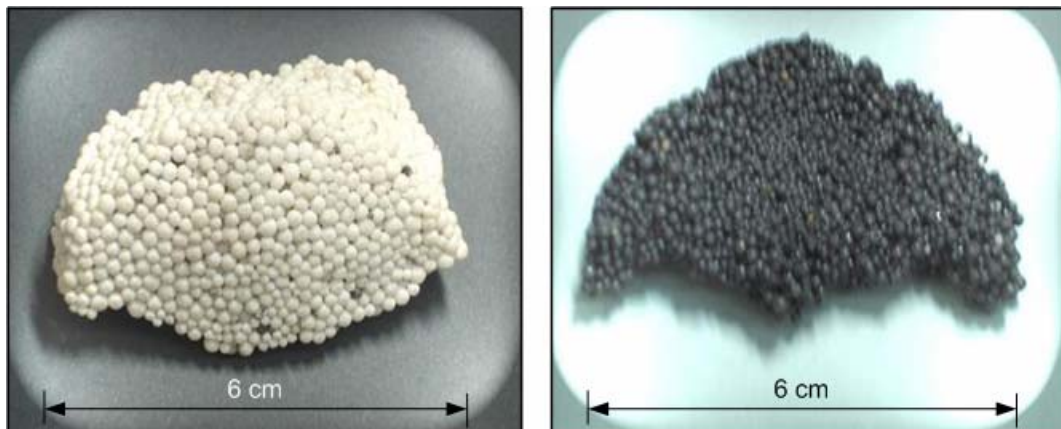
Figura 14. Distribución de tamaño de las perlas para la formulación F14.



3.3 MACRO-EXPANSIÓN DE PERLAS DE POLIESTIRENO

En el montaje mostrado en la Figura 8, se realizó la macro-expansión para las perlas de poliestireno que contenían agua y para las que contenían agua y ferrita. El vacío alcanzado en el recipiente de expansión fue de 20 plg de mercurio. En la Figura 15 se puede observar el resultado de la expansión de las PPS. Las perlas son completamente rígidas, esto es debido a que las paredes de las celdas son de mayor espesor, comparadas con las del EPS, el cual presenta menor rigidez. La existencia de una mayor cantidad de material de PS entre las celdas hace más rígida su estructura.

Figura 15. Resultado de la macro-expansión: perlas de poliestireno que contienen agua (izquierda) y perlas de poliestireno que contienen agua y ferrita (derecha).



Para verificar que hubo una expansión se hizo un análisis de la densidad de las perlas antes y después de la expansión, la cual se observa que varió muy poco, según los resultados mostrados en la Tabla 6, pero esta densidad resultó ser inferior a la del agua. Esto es muy interesante, al igual que otras propiedades del material como las magnéticas, para sus posibles aplicaciones y usos.

Como se observa en las fotografías, las perlas tienen forma esférica, se puede calcular la relación correspondiente al aumento del diámetro debido a la expansión.

$$\frac{D_2}{D_1} = \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^{1/3}$$

Donde

D_1 – Diámetro inicial de la perla [cm]

D_2 – Diámetro final de la perla [cm]

ρ_1 – Densidad inicial de la perla [g/mL]

ρ_2 – Densidad final de la perla [g/mL]

Tabla 6. Variación de la densidad de las perlas debido a la expansión

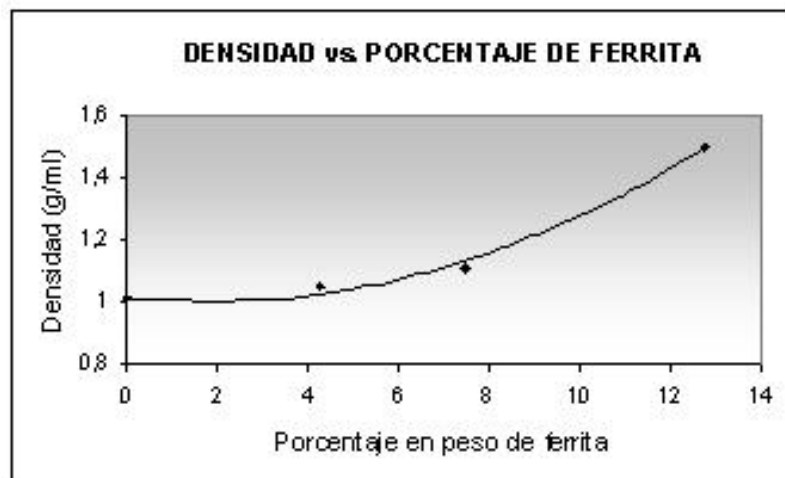
PERLAS DE POLIESTIRENO	DENSIDAD ANTES (g/ml)	DENSIDAD DESPUÉS (g/ml)	D_2/D_1
Con agua	1,01	0,82	1,07
Con agua y ferrita (F15)	1,11	0,87	1,08

3.4 CARACTERIZACIÓN

3.4.1 Pruebas físicas

- **Ensayo para determinar la densidad:** en la Figura 16 se observa que la densidad de las perlas de poliestireno que contienen agua y ferrita aumenta al incrementar el porcentaje en peso de ferrita.

Figura 16. Densidad vs. Porcentaje de ferrita



Se encuentra una relación polinomial de segundo orden en un rango de 0 a 12,7% en peso de ferrita, dada por la ecuación:

$$\rho_P = 0,0042F^2 - 0,0157F + 1,017$$

$$R^2 = 0,9924$$

Donde

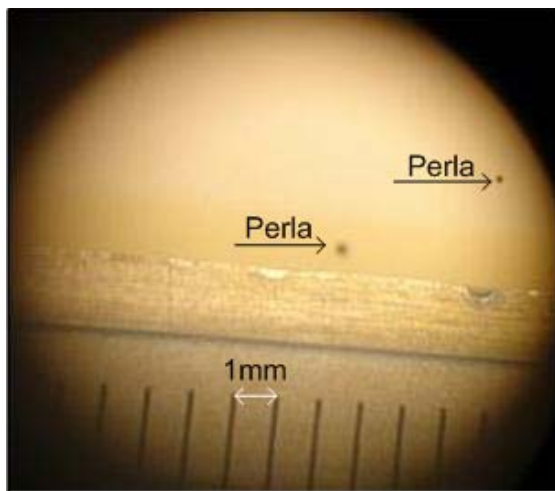
ρ_P - Densidad de las PPS que contienen agua y ferrita [g/ml]

F - Porcentaje en peso de ferrita

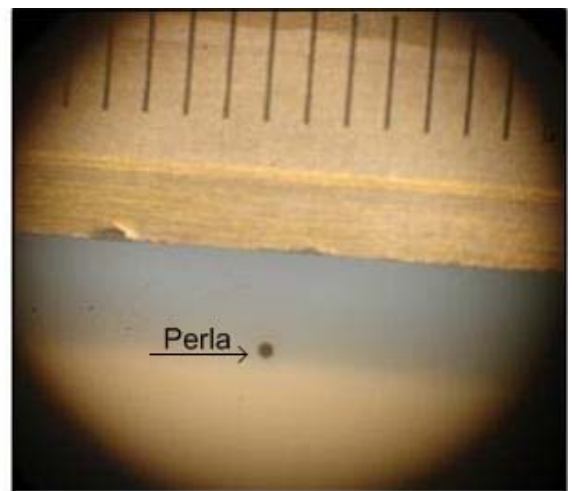
El aumento de la densidad de las perlas que contienen agua y ferrita, con respecto a las que solo contienen agua es apenas lógico, debido a que la densidad de la ferrita es mayor con respecto a los otros componentes de las perlas.

- **Microscopía Óptica:** teniendo en cuenta la distribución de tamaño de las perlas obtenidas, se realizó un análisis para verificar el tamaño y forma de las mismas, para tal fin se dispuso de un calibrador Vernier con espaciamiento de 1mm, el resultado se puede observar en la Figura 17, en la cual se puede apreciar que el menor tamaño de partícula fue de 0,125mm y poseen forma esférica.

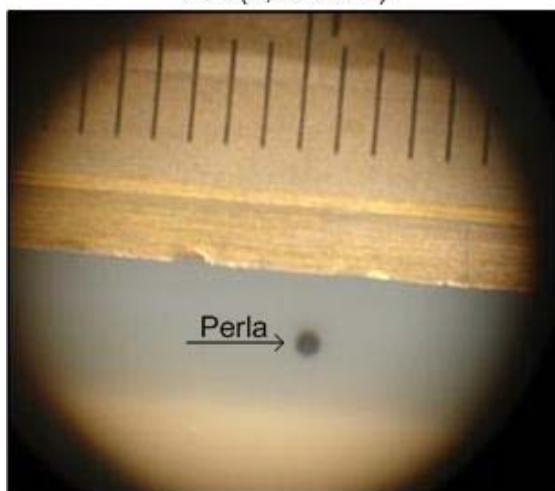
Figura 17. Tamaño de las perlas vistas a través de un estereoscopio, obtenidas mediante diferentes formulaciones (F14, F15 y F9).



F14 (0,125 mm)



F14 (0,25 mm)



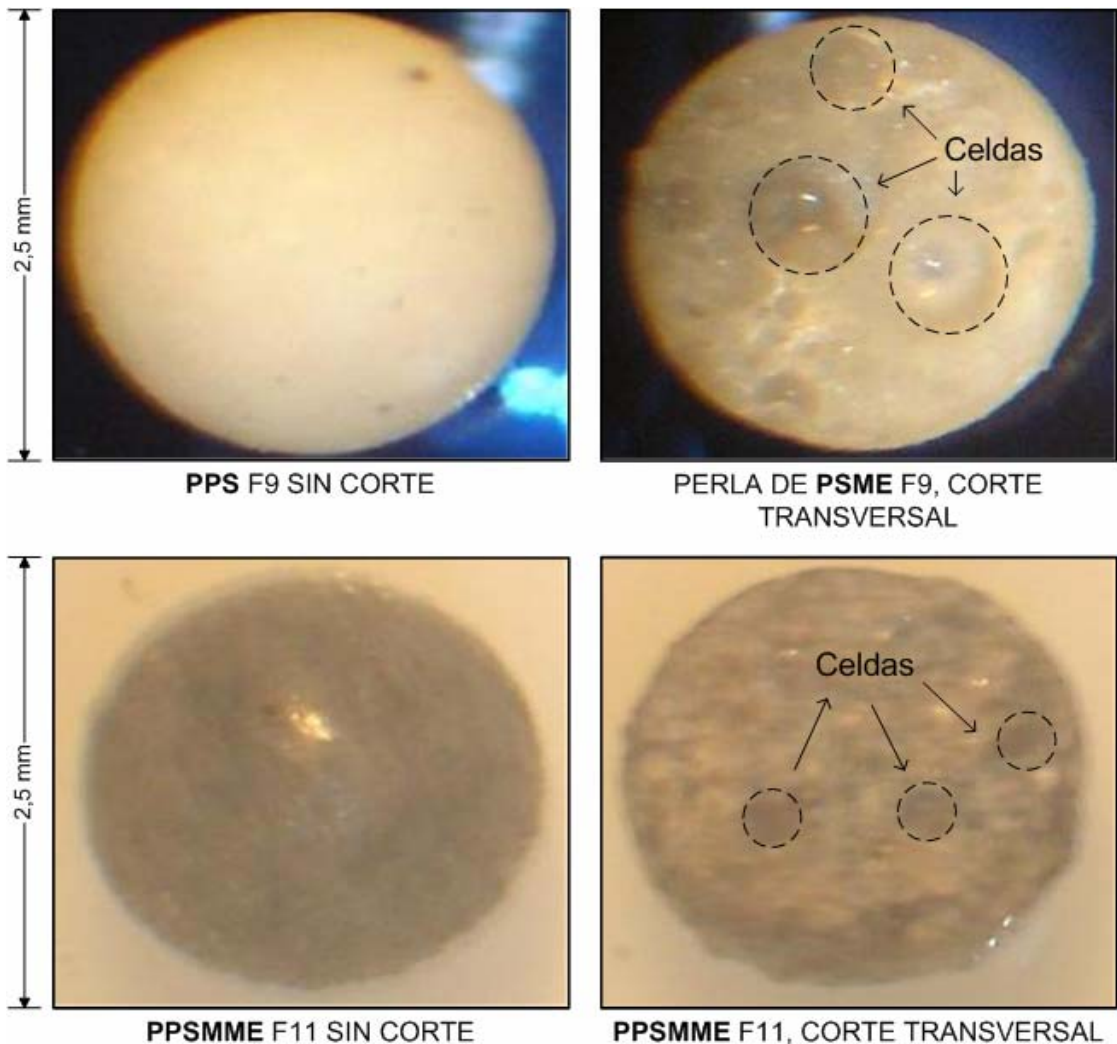
F15 (0.6 mm)



Corte F9 expandida (2,4 mm)

En la Figura 18 se muestran perlas de tamaño de 2,5 mm y 2,4 mm, las cuales presentan una superficie lisa uniforme, de forma esférica, aún después de la macro-expansión. Al realizar el corte transversal se pueden apreciar las celdas formadas en la macro-expansión. Estas celdas son de tamaño ligeramente mayor en el caso de la perla que no contiene ferrita. El tamaño de las celdas dentro de las perlas de PS macro-expandido es muy superior, comparado con las celdas del PS micro-expandido (EPS), pero su número o cantidad dentro de la perla obviamente será inferior, debido a su mayor tamaño.

Figura 18. Corte transversal de las perlas macro-expandidas de acuerdo a las formulaciones F9 y F11 de la Tabla 3.



El resultado de la macro-expansión de las PPS que contienen agua y ferrita fue un aglomerado de perlas de contextura rígida y forma esférica. (ver Figura 19).

Figura 19. Aglomerado de perlas de PSMME obtenidas mediante la formulación F11 de la Tabla 3.



3.4.2 Pruebas fisicoquímicas

- **Análisis Termogravimétrico (TGA):** para observar el contenido de agua en las PPS, se hizo un cálculo del porcentaje en peso perdido entre 100°C y 120°C y para determinar el contenido de ferrita se tomó el porcentaje de residuo a 600°C, debido a que a esta temperatura no hay PS presente o residuos de éste como se ve en el Anexo F.

Los ensayos de TGA para las muestras correspondientes a las formulaciones F14, F15 y F16 se encuentran en los Anexos G, H y E, respectivamente.

Las perlas de poliestireno que contienen agua y ferrita son estables térmicamente hasta una temperatura de 320 °C, como se puede observar en el Anexo I.

- **Calorimetría diferencial (DSC):** en el Anexo J se puede observar que la temperatura de transición vítrea para las PPS que no contienen agua es de 98,7 °C. Para las PPS que contienen agua y ferrita la temperatura de transición vítrea es de 98°C (véase Anexo K).

Debido a que el contenido de agua en los dos tipos de perlas no es el mismo, se presenta una diferencia en las gráficas, esto es consecuencia de la evaporación de la misma que se puede apreciar en el Anexo K. A pesar de la presencia del agua se puede ver que la temperatura de transición vítrea no varió significativamente, como era de esperarse, debido a que el agua no afecta la estructura química del PS.

A la misma muestra de PPS que contienen agua y ferrita, después de realizar una corrida hasta 150 °C, se hizo una nueva corrida (véase Anexo L). El comportamiento del gráfico fue similar al de las PPS que no contienen agua y ferrita.

- **Resistencia química:** luego de mantener sumergidas en diferentes solventes orgánicos, tanto las PPS que contienen agua y ferrita, como las perlas expandidas, durante tres días, se observó que la gasolina, el querosene, el varsol y el thinner hicieron que las perlas se ablandaran lo suficiente para aglomerarse pero sin disolverlas. En el caso del xileno, las perlas fueron disueltas en un período de cinco horas. Con respecto al crudo no se observó ningún ataque (al menos en la primera semana).

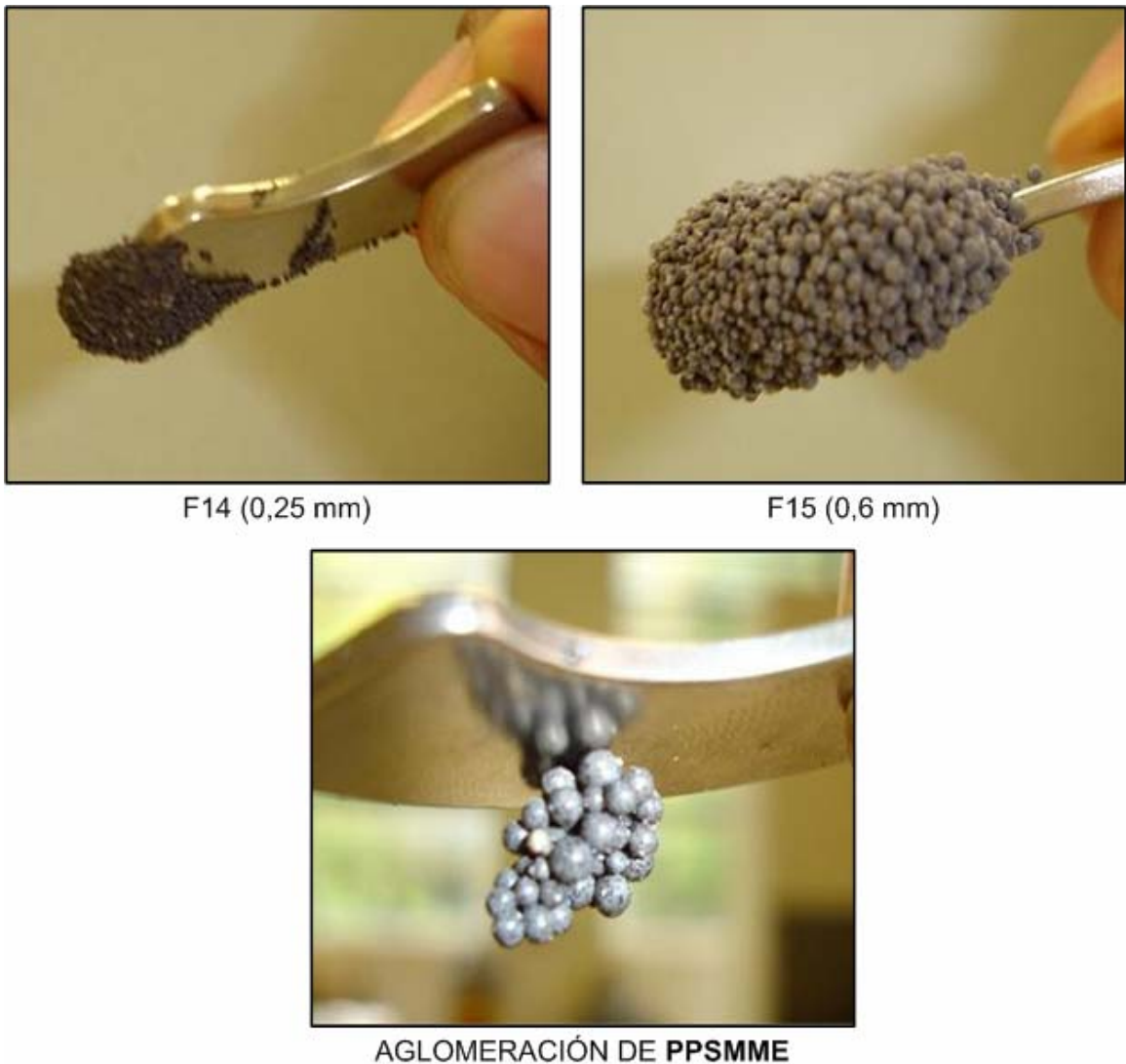
3.4.3. Pruebas magnéticas

- **Inducción remanente:** al realizar la medición de campo magnético a las PPS que contienen agua y ferrita, se obtuvo un campo *nulo*, es decir, estas perlas son súper paramagnéticas; lo que indica que este material responde a un campo

magnético pero no es imán en sí mismo. Para evitar la formación de aglomerados de las perlas, se requiere la condición de súper paramagnetismo, esto es importante para sus posibles aplicaciones en la separación de células.

- **Pruebas de atracción:** al acercar un imán de neodimio a un recipiente con perlas de poliestireno que contienen agua y ferrita, se verificó que éstas son atraídas por el imán, debido a la presencia de la ferrita. El mismo comportamiento se observó con el aglomerado de PSMME como se puede ver en la Figura 20.

Figura 20. Prueba de atracción de las perlas al imán de neodimio.



3.5 APLICACIONES

Como se puede observar en la Figura 21, es posible la recolección de derrames de crudo en agua mediante el uso de perlas de PSMME de densidad menor que la del agua, ya que el crudo posee afinidad con la superficie de las perlas, adhiriéndose uniformemente a éstas. Para retirar el crudo de las perlas se puede hacer un lavado con un solvente orgánico, tal como el varsol, siempre y cuando el tiempo de contacto con ellas no supere las 24 horas. Luego las perlas pueden ser separadas o recuperadas mediante tamices para ser nuevamente utilizadas en el proceso de recuperación de crudo, mediante campos magnéticos, tanto en tierra, como en el agua.

Figura 21. Recolección de derrames de crudo ($^{\circ}\text{API} = 11,3$ a 15°C).



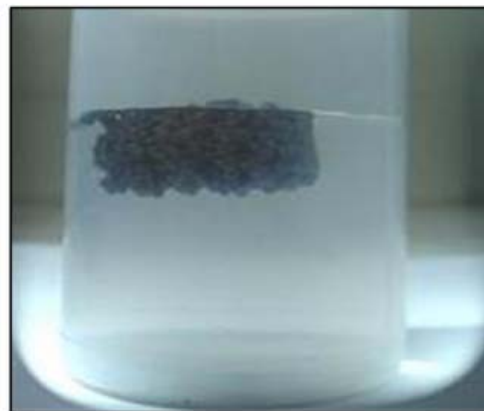
CRUDO EN AGUA



CRUDO CON PPSMME



RECOLECCIÓN DE CRUDO MEDIANTE UN IMÁN DE NEODIMIO



AGLOMERACIÓN DE PPSMME EN AGUA

4. CONCLUSIONES

Se logró obtener y caracterizar perlas de poliestireno magnético mediante polimerización en suspensión. Estas perlas son súper paramagnéticas, tienen forma esférica y superficie uniforme con un contenido de ferrita hasta del 12,7% en peso y tamaño entre 0,125 mm y 2 mm dependiendo de la formulación.

Se demostró que es posible reciclar poliestireno expandido (EPS) para la elaboración de las perlas en un porcentaje máximo de 30% en peso de la mezcla inicial PS-S. Además, la utilización de reactivos de tipo industrial y reciclados, como ferrita y EPS, permite obtener un material económico.

Para realizar la polimerización en suspensión del estireno, con ferrita como material de relleno, es necesaria una etapa de prepolimerización en masa, donde sea incorporada la ferrita y la mezcla alcance una viscosidad adecuada, para que se puedan formar las perlas en la suspensión.

La introducción de agua como agente de expansión en las PPS, permitió la aplicación de éstas para desarrollar el poliestireno macro-expandido (PSME) y el poliestireno magnético macro-expandido (PSMME). El porcentaje máximo de expansión fue del 8% con respecto al diámetro inicial de las perlas, obteniéndose en éstas una densidad menor que la del agua, vislumbrando la posibilidad de una aplicación para el PSMME en la recolección de derrames de crudo tanto en agua como en tierra utilizando campos magnéticos.

5. RECOMENDACIONES

Si se requiere la obtención de PPSM de menor diámetro, es necesario disminuir considerablemente el tamaño de la ferrita a escala de nanómetros, aumentar la velocidad de agitación en el reactor de polimerización y utilizar la técnica de polimerización en emulsión contenida dentro de otra emulsión y no la de polimerización en suspensión.

Para continuar con el desarrollo del poliestireno expandido con agua como agente expansor, se debe tener en cuenta una distribución uniforme y de tamaño micelar del agua en las PPS, lo cual permitiría una micro-expansión mayor del 8% con respecto al diámetro inicial de las perlas, con un aspecto similar al de las perlas que constituyen el EPS comercial (icopor o porexpan).

Realizar pruebas de laboratorio que permitan la utilización de las PPSM en la separación de células.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PENICHE AGÜERO, Hazle, PENICHE COVAS, Carlos, DE LA CAMPA, Alfredo y DÍAZ CASTAÑÓN, Sergio. Preparación y Caracterización de microesferas magnéticas de poliestireno. Revista Iberoamericana de Polímeros. Febrero 2002
- [2] YANASE N., NOGUCHI, ASAKURA H y SUZUTA T. J. Appl. Polymer Sci. 50, 765-776 (1993)
- [3] UGELSTAD, J., BERGE A., ELLINGSEN, T., AUNE, O. y KILAAS L. Makromol. Chem. Macromol. Symp., 17, 177-211 (1988)
- [4] Dexton S.A.
<http://www.dexton.com>
- [5] BILLMEYER, Fred W. Ciencia de los polímeros. Editorial Reverté. Barcelona, 1975.
- [6] SEYMOUR, Raimond B. Introducción a la Química de los Polímeros. Editorial Reverté. Barcelona, 1995.
- [7] MEYSENBUG, C.M. Tecnología de plásticos para ingenieros. Ed.Urmo. 1967p. 38-40
- [8] RUBIN. *Materiales Plásticos, Propiedades y Aplicaciones*. Noriega Ediciones.1991.
- [9] <http://www.anape.es>

- [10] Glöck, G., Hahn, K., and Gellert, R.(1999). Verfahren zur herstellung wasserexpandierbarer styrolpolymerisate. *Deutsches Patent 198 12 8561*.
- [11] Eco EPS
<http://www.anape.es>
- [12] ABAD GUTIERREZ, Oscar Mercado. Tesis de Pregrado “Obtención y caracterización de caucho magnético para mejorar la adherencia en superficies caucho-metal”. Director: Ramiro Salazar . Junio 2003.
- [13] DAVIDENKO, N., ORLOV, D.V. y SASTRE, R. Sistemas electromagnéticos dispersos (SED) PARTE I: Descripción y obtención. *Revista de Plásticos Modernos*, No. 457. Julio 1994.
- [14] VAN EWIIK, G.A. y VROEGE, G.J. Phase Behavior of Magnetic Colloid-Polymer Mixtures: 1. Mean Field Calculations. *American Chemical Society*. No. 18 . 2002.

BIBLIOGRAFÍA

ABAD GUTIERREZ, Oscar Mercado. Tesis de Pregrado "Obtención y caracterización de caucho magnético para mejorar la adherencia en superficies caucho-metal". Director: Ramiro Salazar . Junio 2003.

ASKELAND, Donald. La Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Grupo Editorial Iberoamérica. México, 1987.

BILLMEYER, Fred W. Ciencia de los polímeros. Editorial Reverté. Barcelona, 1975.

CREVECOEUR, J. J., NELISSEN, L., and LEMSTRA, P. J. (1999a). Water expandable polystyrene (weps) part 1. Strategy and procedures. *Polymer*, **40**, p. 3685-3689.

CREVECOEUR, J. J., NELISSEN, L., and LEMSTRA, P. J. (1999b). Water expandable polystyrene (weps) part 2. In-situ synthesis of (block) copolymer surfactants. *Polymer*, **40**, p. 3691-3696.

DAVIDENKO, N., ORLOV, D.V. y SASTRE, R. Sistemas electromagnéticos dispersos (SED) PARTE I: Descripción y obtención. Revista de Plásticos Modernos, No. 457. Julio 1994.

ESPESO GARCÍA, Jorge F., PÉREZ BLANCO, Esteban. *El poliestireno expandido, aplicaciones en la construcción*. Revista de Plásticos Modernos, Vol. 84. No. 558. Diciembre 2002.

Glück, G., Hahn, K., and Gellert, R. (1999). Verfahren zur herstellung wasserexpandierbarer styrolpolymerisate. *Deutsches Patent 198 12 856 A 1*.

LÓPEZ, Daniel. *Geles poliméricos y sus aplicaciones: ferrogels, rotores magnéticos libres y aerogels*. Instituto de Ciencia y Tecnología de Polímeros CSIC. Revista de Plásticos Modernos. Vol.84 No. 557.

LÓPEZ, Daniel, CENDOYA, Ione, TORRES, Francesc, TEJADA, Javier y MIJANGOS, Carmen. *Preparation and Characterization of Polystyrene-Based Magnetic Nanocomposites. Thermal, Mechanical and Magnetic Properties*. Polymer Engineering and Science. November 2001. Vol. 41. No. 11.

MEYSENBUG, C.M. Tecnología de plásticos para ingenieros. Ed.Urmo. 1967 p. 38-40

ORTUETA, Ramón. Materiales Magnéticos: Teoría, Metalurgia y Aplicaciones. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid, 1955

PENICHE AGÜERO, Hazle, PENICHE COVAS, Carlos, DE LA CAMPA, Alfredo y DÍAZ CASTAÑON, Sergio. Preparación y Caracterización de microesferas magnéticas de poliestireno. Revista Iberoamericana de Polímeros. Febrero 2002

Plásticos. Poliestireno expandible. Ensayos. NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. NTC 1424. ICONTEC. 1978

POGANY, G. A. (1976). Anomalous diffusion of water in glassy polymers. *Polymer*, **17**, p. 690-694.

RUBIN. *Materiales Plásticos, Propiedades y Aplicaciones*. Noriega Ediciones.1991.

SEYMOUR, Raimond B. Introducción a la Química de los Polímeros. Editorial Reverté. Barcelona, 1995.

SNIJDERS, Emile A. Water expandable polystyrene (WEPS): computational and experimental analysis of bubble growth. Universidad de Eindhoven, 2003.

SMITH, William. Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Editorial McGraw-Hill. Mexico D.F., 1998.

UGELSTAD, J., BERGE A., ELLINGSEN, T., AUNE, O. y KILAAS L. Makromol. Chem. Macromol. Symp., 17, 177-211 (1988)

VAN EWIJK, G.A. y VROEGE, G.J. Phase Behavior of Magnetic Colloid- Polymer Mixtures: 1. Mean Field Calculations. American Chemical Society. No. 18 . 2002.

YANASE N., NOGUCHI, ASAKURA H y SUZUTA T. J. Appl. Polymer Sci. 50, 765-776 (1993)

<http://www.anape.es>

<http://www.dexton.com>

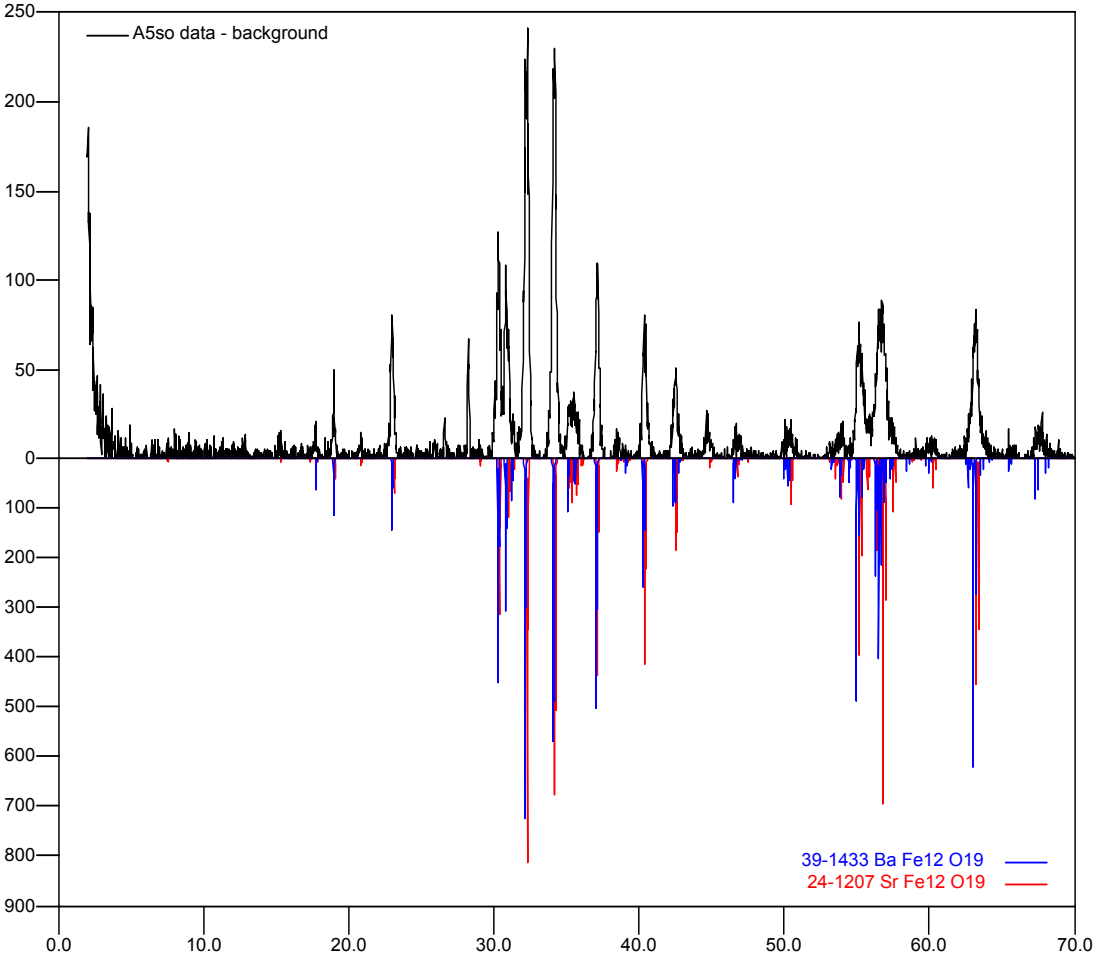
ANEXOS

ANEXO A. Comportamiento químico del EPS

Agua:	Gases:	Alcoholes:		
Agua de mar	+ a) inorganico	Metanol	+-	
Agua	+ Amonio	- Etanol	+-	
		Bromina	- Etilenglicol	+
Alcalis:		- Clorina	- Dietilenglicol	+
Agua de amonio	+ Dioxido de sulfuro	- Isopropanol	+	
Tintes (hipoclorito, peroxido de hidrogeno)	+	Butanol	+-	
Solucion de hidroxido de potasio	+ b) organicos	Ciclohexanol	+	
Agua de limo	+ Butadieno	- Glicerina	+	
Solucion de sosa caustica	+ Butano	- Coconut oil alcohol	+	
Soluciones de jabon	+ Buteno	-		
	Gas Natural	+ Aminas:		
	Etano	+ Anilina	-	
Acidos diluidos:	Etano (etileno)	+ Dietilamina	-	
Acido formico, 50%	+ Etino (acetileno)	+ Etilamina	+	
Acido acetico, 50%	+ Metano	+ Trietilamina	-	
Acido fluorhidrico, 4%	+ Propano	+		
Acido fluorhidrico 40 %	+ Propeno (propileno)	+ Miscelaneas sustancias organicas:		
Acido fosforico, 7 %	+ Oxido de propeno (propilen)	- Acetona	-	
Acido fosforico, 50%	+	Acetonitrilo	-	
Acido nitrico, 13 %	+ Gases licuados:	Acilonitrilo	-	
Acido nitrico, 50%	+ a) inorganicos	Dimetilformamida	-	
Acido clorhidrico, 7%	+ Amonio	+ Esteres	-	
Acido clorhidrico, 18 %	+ Gases inertes	+ Eteres	-	
Acido sulfurico, 10%	+ Oxigeno (riesgo de explosion)	+ Hidrocarbomos halogenados	-	
Acido sulfurico, 50%	+ Dioxido de sulfuro	- Ketones	-	
	Nitrogeno	+ Disolventes de pinturas	-	
	Hidrogeno	+ Aceite de oliva	+	
Acidos concentrados:		Tetrahidrofurano	-	
Acido formico, 99 %	+ b) organicos			
Acido acetico, 96 %	- Metano	+ Materiales de construccion inorganicos:		
Acido propano, 99%	- Etano	+ Anhidrita	+	
Acido nitrico, 65 %	+ Etano	- Yeso	+	
Acido clorhidrico, 36 %	+ Oxido de eteno	- Limos	+	
Acido sulfurico, 98 %	+ Etino (acetileno)	- Arena	+	
	Propano	- Cemento	+	
	Propeno	-		
Acidos de fumigacion:	Oxido de propeno	- Materiales de construccion organicos:		
Acido nitrico	- Butano	- Bitumen	+	
Acido sulfurico	- Buteno	- Reductores de curado rapido a base de agua y masa bituminosa	+	
	Butadieno	- Reductores de curado rapido a base de disolventes y masa bituminosa (libres de aromaticos)	-	
	Gas Natural	+		
Anhidridos:		Aromaticos:		
Anhidrido acetico	-	Benceno	-	
Dioxido de carbono solido	+ Hidrocarbomos alifaticos:	Cumeno	-	
Trioxido de sulfuro	- Ciclohexano	- Etilbenzeno	-	
	Fuel (diesel)	- Fenol, 1 % solucion acuosa	+	
	Heptano	- Fenol, 33% solucion acuosa.	-	
Acidos debiles:	Hexano	- Estireno	-	
Acido humico	+ Aceite de parafina	+- Tolueno	-	
Acido carbonico	+ White spirit 55-95 °C	- Xileno	-	
Acido lactico	+ White spirit 155-185 °C	-		
Acido tartarico	+ Vaselina	+ Vapores de :		
Acido citrico	+ Gasolina (normal y super)	- Alcanfor	-	
		Naftalina	-	

+ = sin cambios (≥ 0) = resistente +- = cambio ligero (≥ 2) = resistencia limitada (pequeño cambio en las dimensiones)
 - = severamente dañado (≥ 5)
 = no resistente

ANEXO B. Difractograma de una muestra de la carga magnética de relleno (Ferrita)



ANEXO C. Costos de materias primas

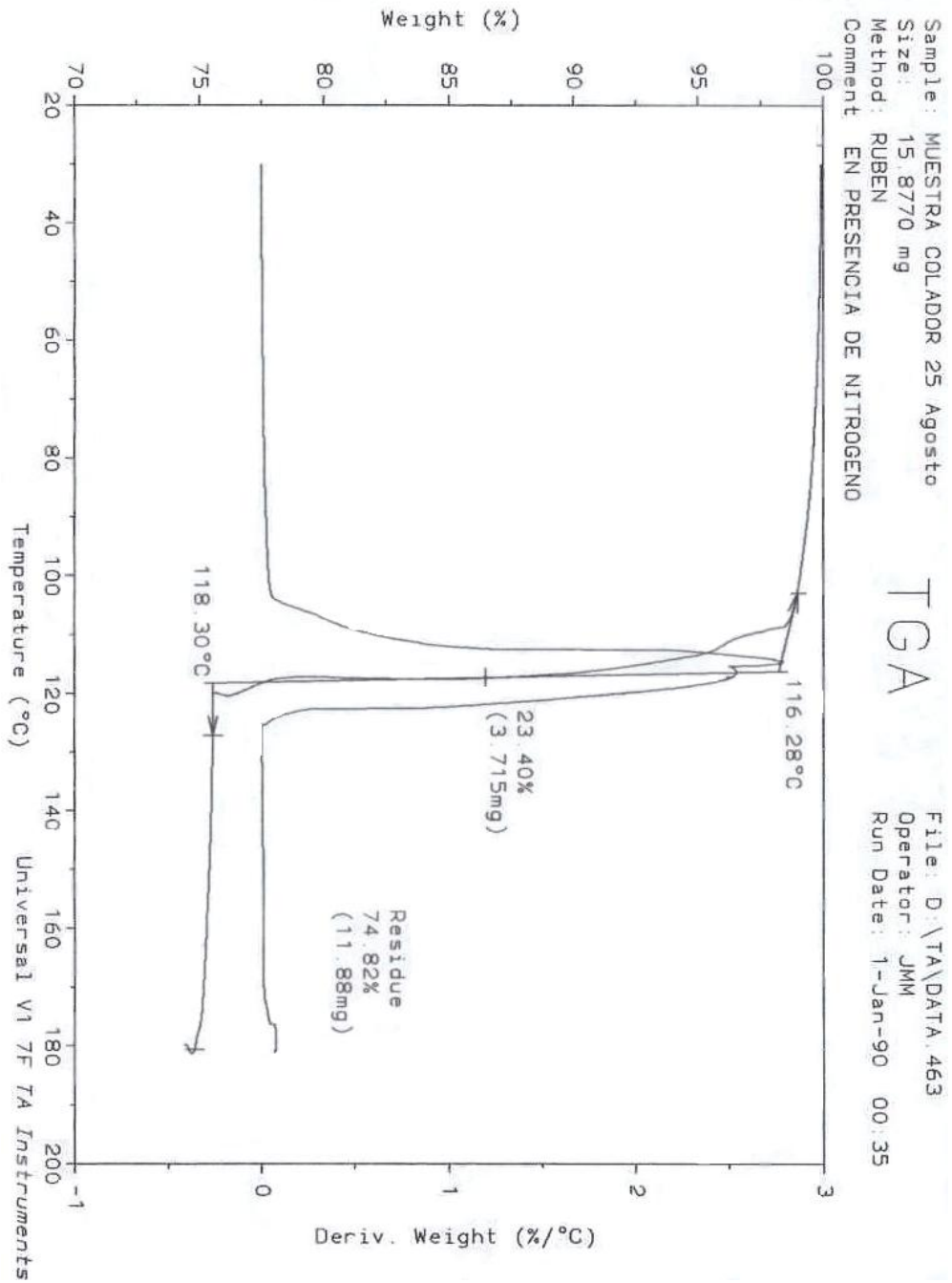
MATERIA PRIMA	CANTIDAD (Kg)	PRECIO (\$)	PROVEEDOR
Estireno	1	5600	UNICOR S.A.
MEC	1	9000	UNICOR S. A.
Naftenato de Co	0,25	3000	UNICOR S.A.
Ferrita	1	8500*	Recicladores
HEC	1	20000	SUQUIM
GENAPOL	1	5000	Lab. León
Agua destilada	1	4650	Lab. León

*Dato tomado de la Tabla 48 y llevado a precios de 2004 [9]

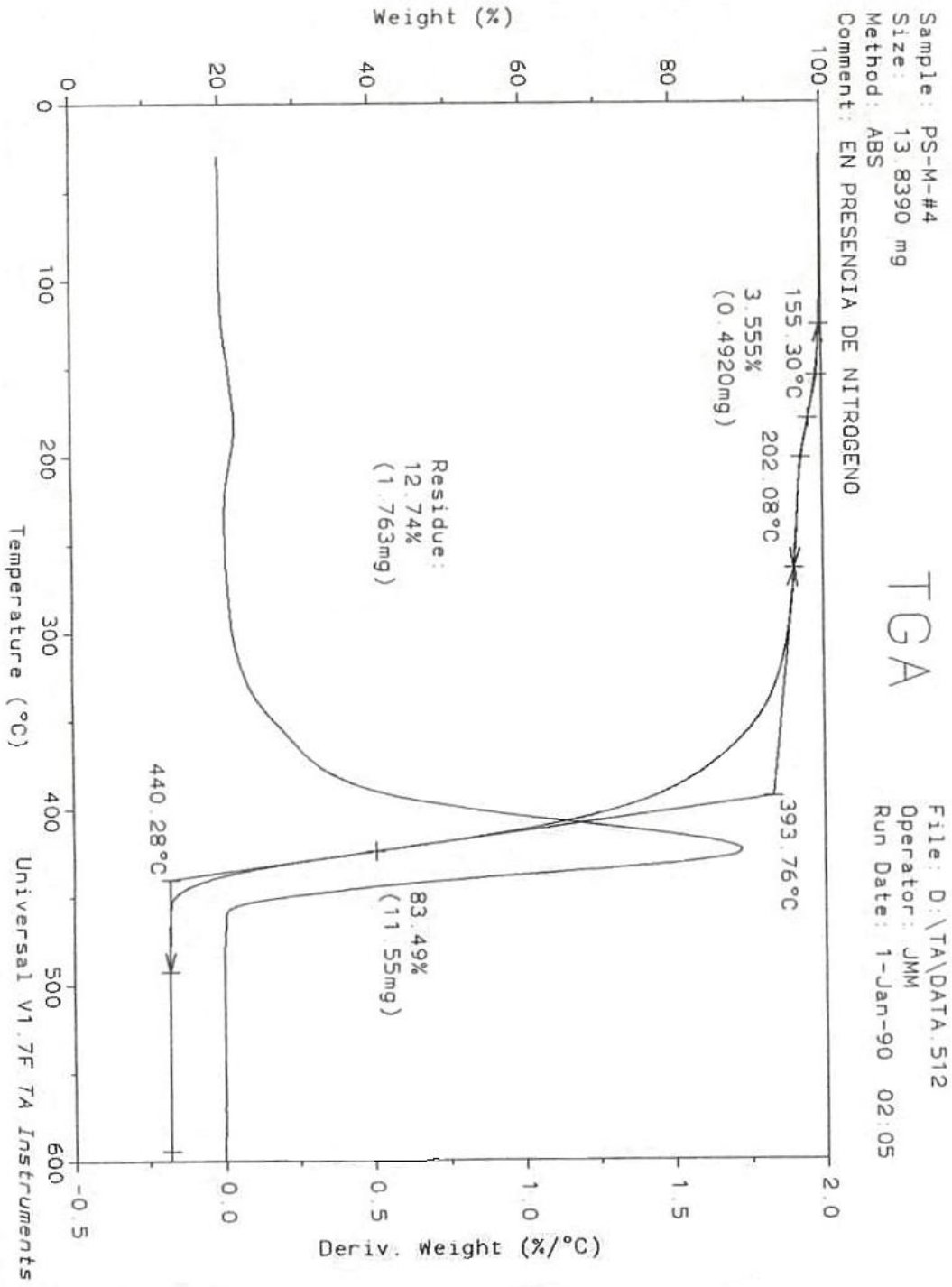
Costo de materias primas para obtener 1kg de PPSM:

MATERIA PRIMA	CANTIDAD (Kg)	PRECIO (\$)
Estireno	0,7	3920
MEC	0,0021	162
Ferrita	0,005	4250
Naftenato de Co	0,001	12
HEC	0,0005	100
GENAPOL	0,002	10
Agua destilada	0,075	35
TOTAL		8489

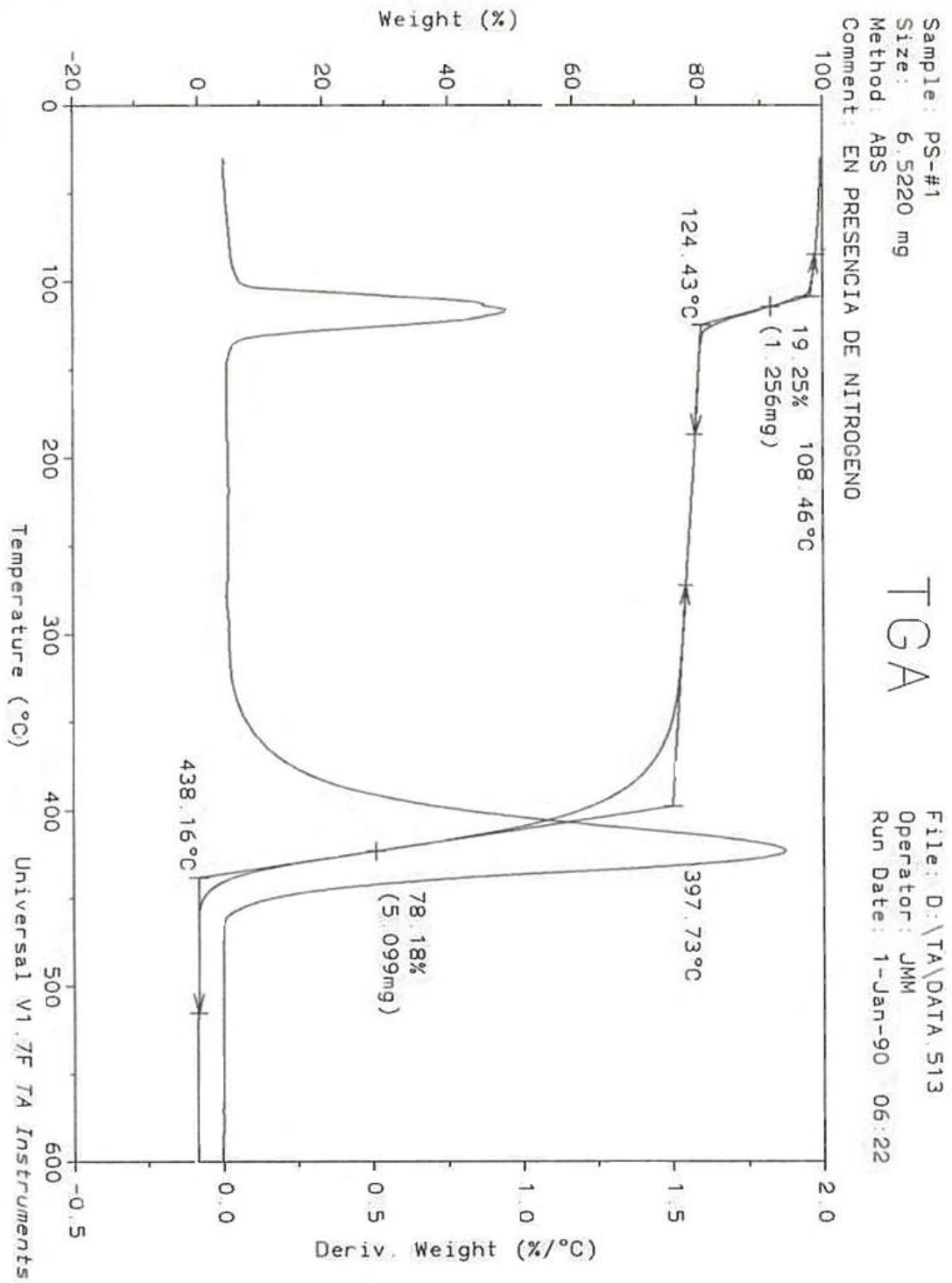
ANEXO D. Análisis termogravimétrico de la formulación F9 en un rango de temperatura de 30°C a 180°C (máximo contenido de agua)



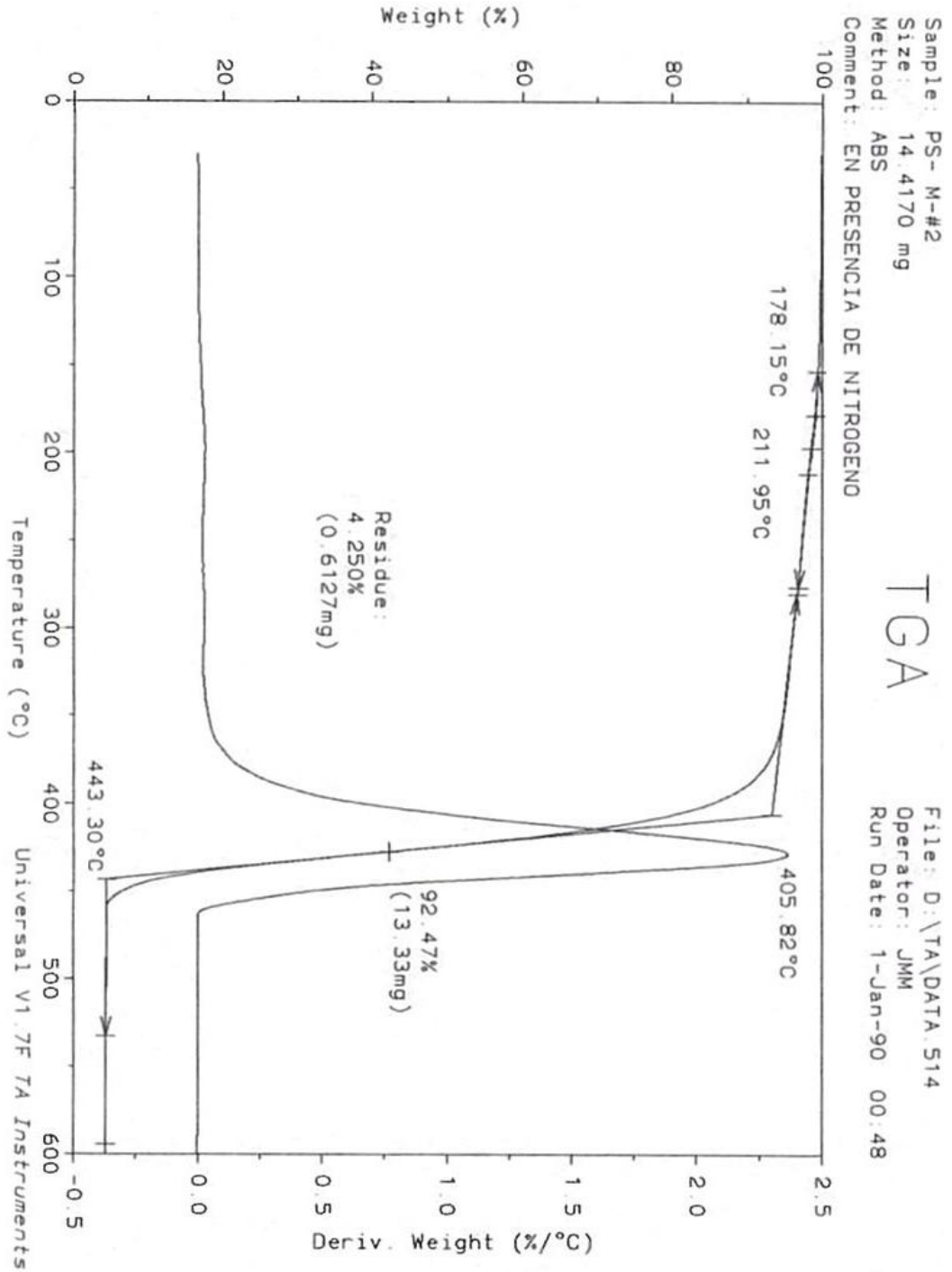
ANEXO E. Análisis termogravimétrico de la formulación F16 (máximo contenido de ferrita)



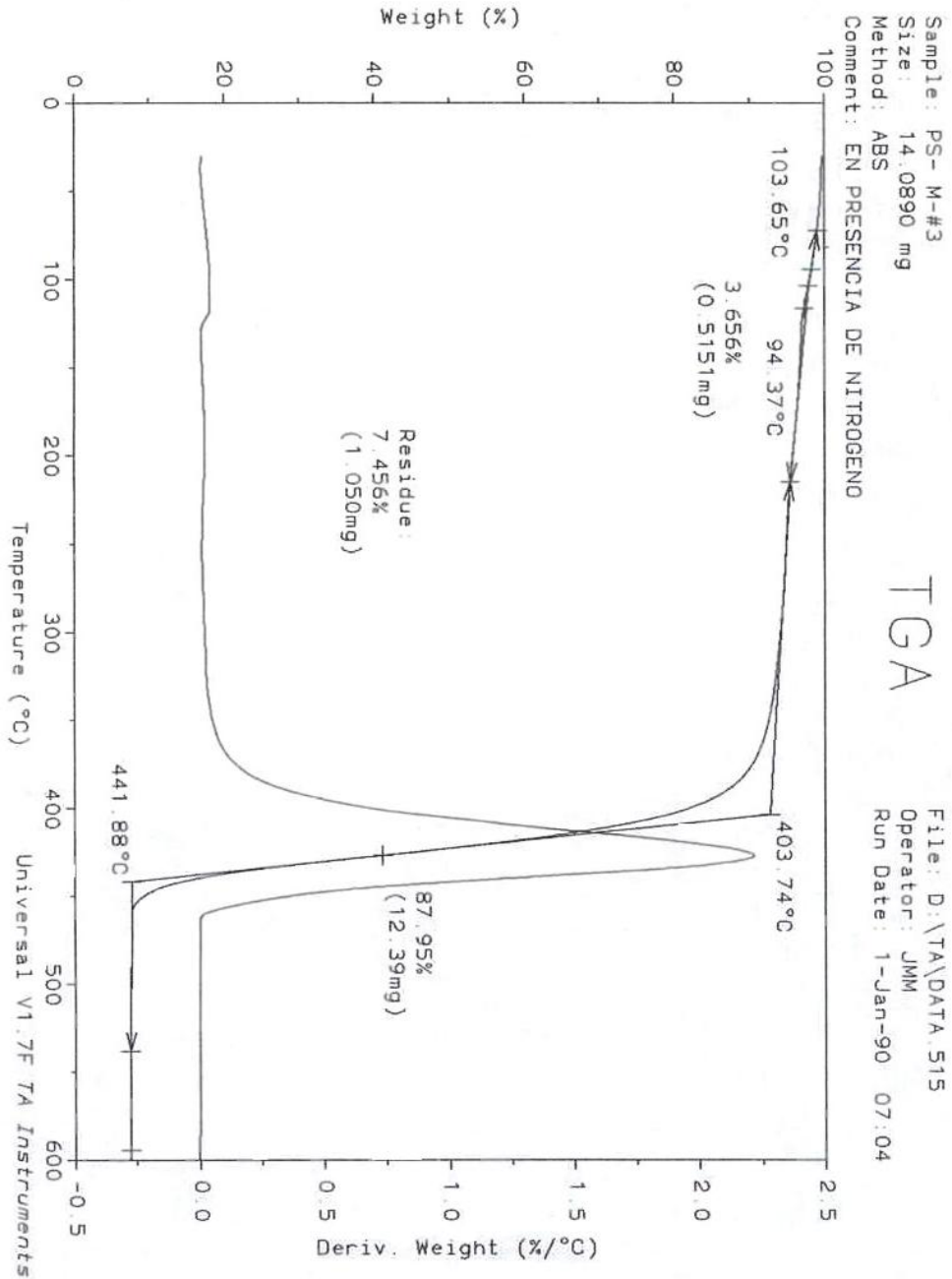
ANEXO F. Análisis termogravimétrico de la formulación F9



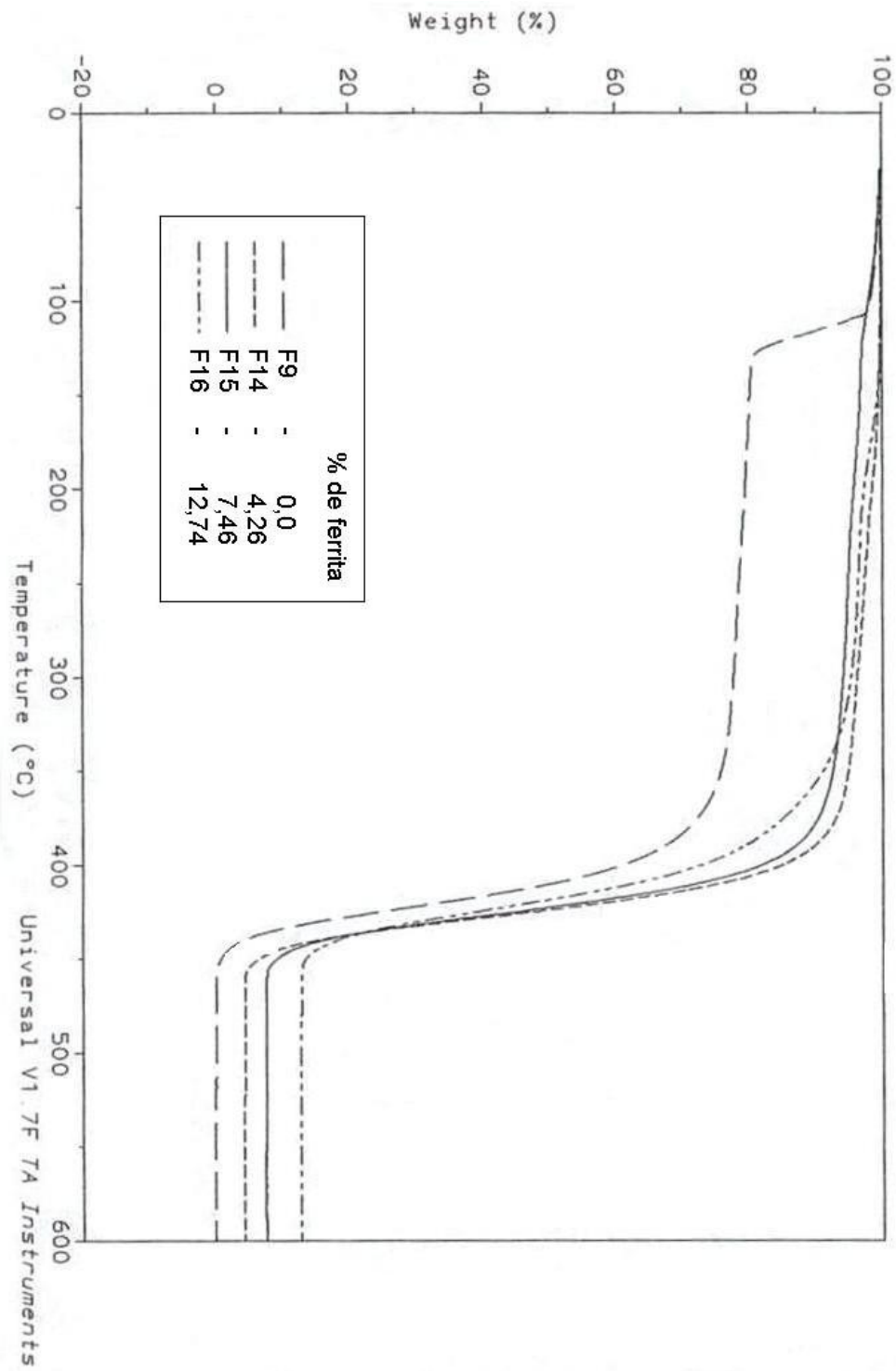
ANEXO G. Diagrama del análisis térmico gravimétrico para la formulación F14



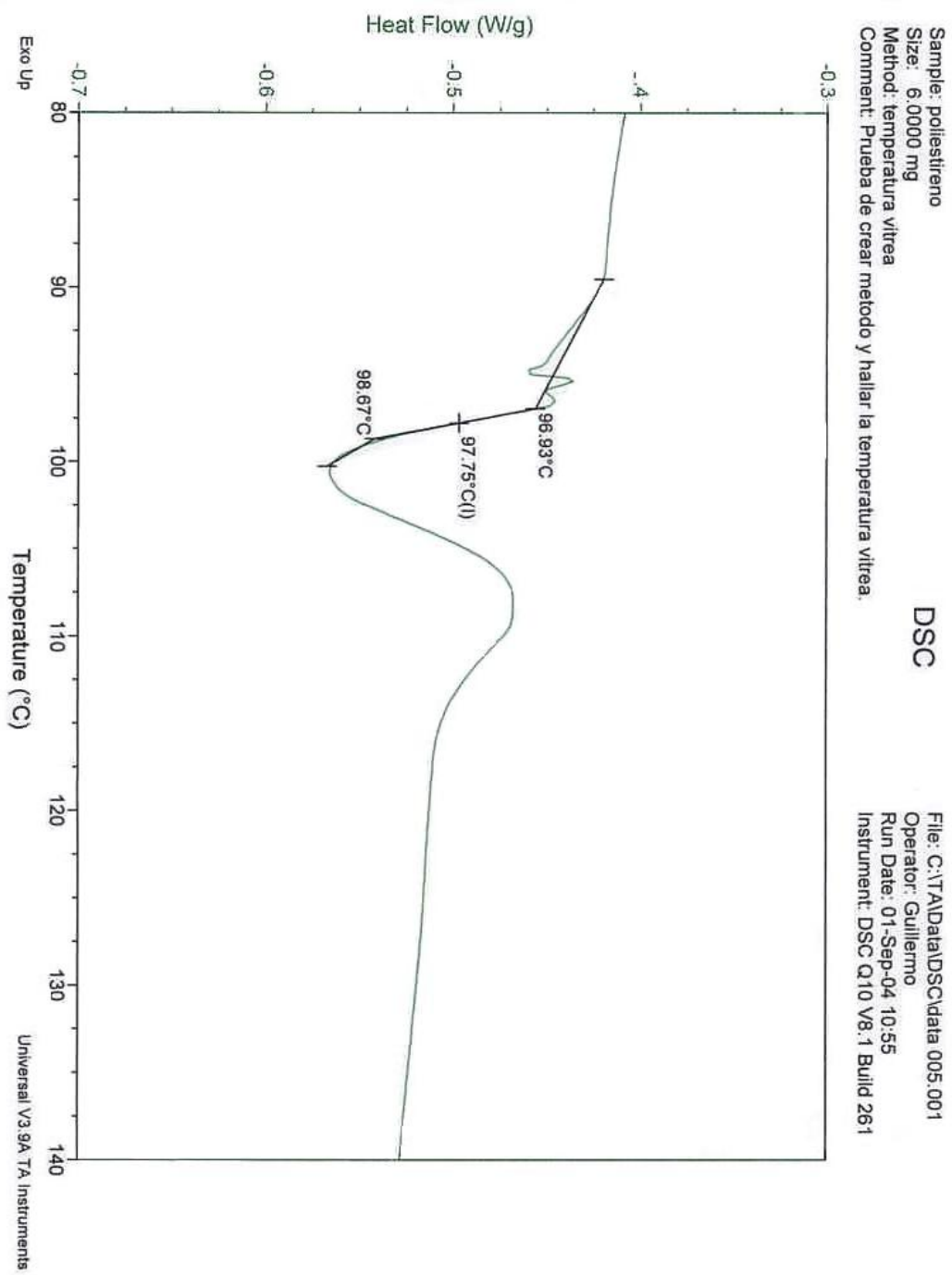
ANEXO H. Diagrama del análisis térmico gravimétrico para la formulación F15



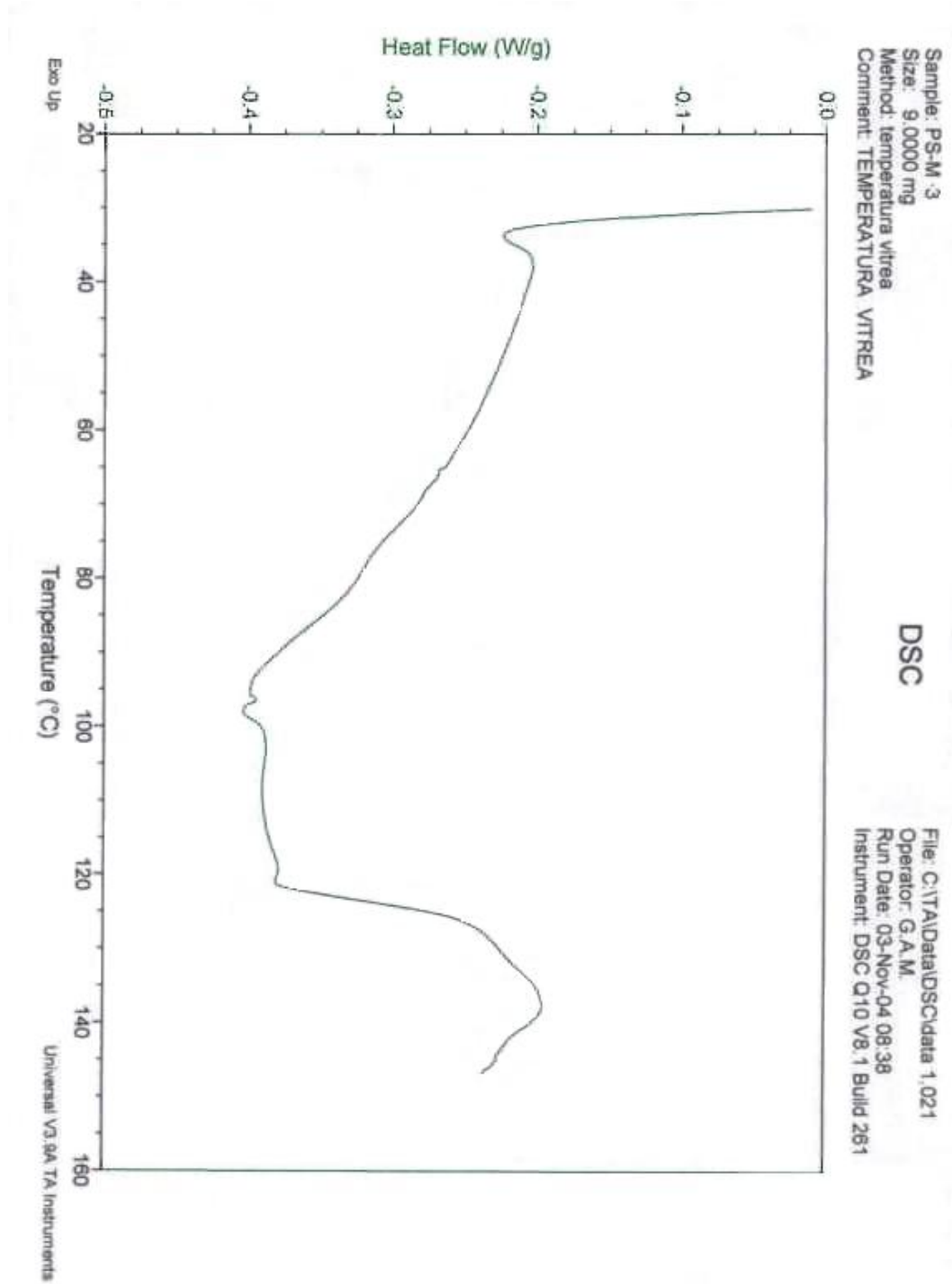
ANEXO I. Comparación de los diagramas de termogravimetría.



ANEXO J. Diagrama de calorimetría diferencial para la formulación F2



ANEXO K. Diagrama de calorimetría diferencial para la formulación F15



ANEXO L. Diagrama de calorimetría diferencial para la formulación F15, después de eliminar la historia térmica

