

Evaluation of Plastic Waste and Catalysts for Application in Thermochemical Processes

Williams Ramos, Eng.¹, Víctor Pretell, MSc¹.

¹Grupo de Investigación en Procesos Termoquímicos - Facultad de Ingeniería de Petróleo, Gas Natural y Petroquímica - Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, wramos@fip.uni.edu.pe, vpretell@fip.uni.edu.pe

Abstract— In Peru the plastics industry generates plastic waste of which only 50% are recycled. Likewise, fluidized catalytic cracking units annually produce significant amounts of catalyst that must be disposed as a solid residue. In this investigation, three samples of plastic waste from urban solid waste, a sample of fresh catalyst and another of FCC equilibrium catalyst were characterized, the equilibrium catalyst sample was heat treated to restore its catalytic properties and characterized with and without previous treatment. The characterization was performed by FTIR analysis and thermogravimetry. It was determined that the three samples of plastic waste analyzed were High Density Polyethylene (HDPE) and it was found that one of the three samples has a different thermogravimetric behavior because its maximum decomposition temperature is different. Likewise, it was determined that the fresh catalyst of Fluidized Catalytic Cracking (FCC) has a different chemical structure and thermogravimetric behavior than the treated and untreated equilibrium catalyst (E-Cat) samples. It is concluded that the samples of plastic waste are HDPE and have potential for use as a load of thermochemical processes, also the E-Cat have potential as catalysts in these processes.

Keywords— Plastic wastes, catalysts, infrared analysis, thermogravimetric analysis.

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.131>

ISBN: 978-958-52071-4-1 ISSN: 2414-6390

Evaluación de Residuos Plásticos y Catalizadores para su Aplicación en Procesos Termoquímicos

Evaluation of Plastic Waste and Catalysts for Application in Thermochemical Processes

Williams Ramos, Eng.¹, Víctor Pretell, MSc¹.

¹Grupo de Investigación en Procesos Termoquímicos - Facultad de Ingeniería de Petróleo, Gas Natural y Petroquímica - Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, wramos@fip.uni.edu.pe, vpretell@fip.uni.edu.pe

Resumen— En el Perú la industria de los plásticos genera residuos plásticos de los cuales solo se reciclan el 50 %. Asimismo, las unidades de craqueo catalítico fluidizado producen anualmente importantes cantidades de catalizador que se debe disponer como residuo sólido. En esta investigación se caracterizó tres muestras de residuos plásticos provenientes de residuos sólidos urbanos, una muestra de catalizador fresco y otra de catalizador de equilibrio de FCC, la muestra de catalizador de equilibrio fue tratada térmicamente para restaurar sus propiedades catalíticas y se caracterizó con y sin tratamiento previo. La caracterización se realizó por análisis FTIR y termogravimetría. Se determinó que las tres muestras de residuos plásticos analizados eran Polietileno de Alta Densidad (HDPE) y se comprobó que una de las tres muestras tiene un comportamiento termogravimétrico distinto porque su temperatura de máxima descomposición es diferente. Asimismo, se determinó que el catalizador fresco de Craqueo Catalítico Fluidizado (FCC) tiene una estructura química y un comportamiento termogravimétrico distinto que las muestras de catalizadores de equilibrio (E-Cat) tratada y sin tratar. Se concluye que las muestras de residuos plásticos son HDPE y tienen potencial para su uso como carga de procesos termoquímicos, asimismo los E-Cat tienen potencial como catalizadores en dichos procesos.

Palabras claves— Residuos plásticos, catalizadores, análisis infrarrojo, análisis termogravimétrico.

Abstract— In Peru the plastics industry generates plastic waste of which only 50% are recycled. Likewise, fluidized catalytic cracking units annually produce significant amounts of catalyst that must be disposed as a solid residue. In this investigation, three samples of plastic waste from urban solid waste, a sample of fresh catalyst and another of FCC equilibrium catalyst were characterized, the equilibrium catalyst sample was heat treated to restore its catalytic properties and characterized with and without previous treatment. The characterization was performed by FTIR analysis and thermogravimetry. It was determined that the three samples of plastic waste analyzed were High Density Polyethylene (HDPE) and it was found that one of the three samples have a different thermogravimetric behavior because its maximum decomposition temperature is different. Likewise, it was determined that the fresh catalyst of Fluidized Catalytic Cracking (FCC) has a different chemical structure and thermogravimetric behavior than the treated and untreated equilibrium catalyst (E-Cat) samples. It is concluded that the samples of plastic waste are HDPE and have

potential for use as a load of thermochemical processes, also the E-Cat have potential as catalysts in these processes.

Keywords— Plastic wastes, catalysts, infrared analysis, thermogravimetric analysis.

I. INTRODUCCIÓN

La industria peruana de los plásticos inicio en los años de 1930 debido a la necesidad de abastecer de productos a las industrias emergentes de esas fechas, como la industria del calzado y la industria farmacéutica. Fue en los años de 1960 donde se tuvo un amplio desarrollo debido al crecimiento de la demanda de los productos plásticos. Desde sus inicios hasta la fecha, la industria del plástico en el Perú depende de la importación de materias primas e insumos provenientes de otros países [1]–[3].

Los únicos procesos que se manejan en el país son procesos mecánicos como la extrusión, el soplado, entre otros. Estos procesos son los encargados de darle forma a los polímeros base como el polietileno de alta densidad (HDPE), polietileno de baja densidad (LDPE), polipropileno (PP), tereftalato de polietileno (PET) entre otros, hacia un producto final, que en general presenta como característica el ser ligero, económico y duradero. Algunas de las propiedades que hacen útiles a los plásticos también lo convierten en residuos porque tienen un tiempo de degradación muy alto, pudiéndose mantener en el medio ambiente por cientos o incluso miles de años debido a su estabilidad y durabilidad. Es por esto por lo que son considerados como un contaminante del medio ambiente [3]–[6].

Los residuos que se generan en la industria plástica son desechados o son reciclados mecánicamente, de todos ellos, menos del 50 % son reciclados y el 90 % de este reciclaje se realiza de manera informal [7]–[10].

Como se observa en la Tabla I, para el año 2018 se importó 275 502 TM/año de polipropileno y 349 938 TM/año de polietileno [8], [11]–[13], por esta razón se requiere buscar maneras alternativas de reciclar los residuos de plástico que se generan en el país producto del crecimiento de los niveles de producción y consumo. Los procesos normales de reciclado mecánico pueden ser aplicables, pero se obtiene un producto de menor calidad, asimismo hay restricciones legales para su uso ya que los residuos plásticos en dimensiones menores a 5

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.131>

ISBN: 978-958-52071-4-1 ISSN: 2414-6390

mm, denominados microplásticos han devenido en un acuciante problema ambiental.

TABLA I
IMPORTACIÓN DE PRINCIPALES PLÁSTICOS AL PERÚ EN EL AÑO 2018

Tipo de plástico	Importación del Plástico (MMS/mes)	Importación del PP (MM \$/año)	Costo internacional del PP (\$/TM)	Total (TM/año)
PP	28.65	343.8	1245	275 502
LDPE	19.32	231.84	1300	178 338
HDPE	18.59	223.08	1300	171 600
Total, PE (LDPE+HDPE)	37.91	454.92	1300	349 938
PET	1.95	23.4	1340	17 463

Adicional a esto, en el Perú existe un déficit (comparado con la demanda) en la producción de combustibles líquidos en las refinéncias, por lo que el resto de combustible necesario para abastecer el mercado interno es importado (se importa alrededor de 22 680 MB por año de Diésel 2 y 1 476 MB por año de gasolinas), así como también existe importación de Crudo (se importa alrededor de 36 720 MB por año) para adicionar al crudo nacional.

Por ello actualmente se investigan métodos de reciclaje químico de plásticos y nuevas alternativas para la producción de combustibles líquidos de manera no convencional, de esta forma se tratan de cumplir dos objetivos: reutilizar los residuos de plásticos y suplementar la demanda de combustibles. Unos de estos métodos son los procesos termoquímicos como la pirólisis y la gasificación, que consisten en la degradación térmica (con o sin catalizador) de una materia prima en ausencia de oxígeno, pudiendo ser esta materia prima biomasa, residuos sólidos urbanos, residuos industriales, entre otros. En la pirólisis se obtienen productos líquidos, sólidos y gaseosos a condiciones moderadas, mientras que en la gasificación se prioriza la obtención de productos gaseosos a condiciones severas. Además, uno de los residuos sólidos urbanos que potencialmente pueden ser fuente de combustibles líquidos son los residuos plásticos [14]–[17].

En los procesos de craqueo catalítico fluidizado (FCC) que se emplean en la refinación del petróleo se utilizan catalizadores compuestos por zeolitas, periódicamente se retira una cantidad de catalizador para ser reemplazado por catalizador fresco porque el catalizador va perdiendo parte de su actividad catalítica ya que se depositan coque y metales sobre su superficie, al catalizador que circula por el sistema de craqueo catalítico fluidizado al ser una mezcla de catalizador fresco y en operación recibe el nombre de catalizador de equilibrio. Se estima que en una unidad de FCC se puede generar entre 300 a 600 TM/año de catalizador gastado [18].

En el Perú la legislación vigente considera al catalizador gastado como un residuo peligroso, el generador debe disponer adecuadamente el residuo y el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA) es el encargado de la fiscalización, la información oficial aún no se ha

consolidado y publicado respecto al volumen de catalizador dispuesto anualmente en los rellenos de seguridad.

La presente investigación pretende realizar la caracterización química y termogravimétrica de las muestras de residuos plásticos de residuos sólidos urbanos, del catalizador fresco y de equilibrio de la unidad de craqueo catalítico de una refinéncia local, para de esta forma evaluar su potencial aplicación en procesos termoquímicos.

II. MÉTODOS Y MATERIALES

A. Residuos plásticos

Se adquirieron tres muestras de residuos plásticos de treinta (30) kg cada una (molidos y lavados, provenientes de relleno sanitarios) de la empresa “Multiservicios de Molido y Lavado de Plástico E.I.R.L. (MMOLPLAST E.I.R.L.)” ubicada en el distrito de Puente Piedra-Lima. El tamaño de partícula varía desde menos a 2 mm hasta 8 mm aproximadamente. Se realizó un tamizado clasificándolo en cuatro grupos según el tamaño de partícula: menor a 2 mm, de 2 a 4 mm, de 4 a 6 mm y de 6 a 8 mm de lado. En la presente investigación se trabajó con los residuos plásticos de tamaño de partícula menor a 2 mm de lado. Cada muestra tiene diferentes características en color y forma, como se muestra en la Fig. 1. La muestra 1 se caracteriza por tener un color blanco-plomo y de forma granular y dura al tacto, la muestra 2 presento un color blanco-amarillo también de forma granular y dura al tacto, y la muestra 3 presento un color blanco, forma laminar y dura al tacto.



Fig. 1 Residuos plásticos. Izquierda: Muestra 1, Centro: Muestra 2, Derecha: Muestra 3

Para obtener muestras suficientes para los posteriores análisis (tamaño de partícula menor a 2 mm) se molieron los residuos plásticos de 6 a 8 mm de tamaño de partícula en un molino de cuchillas ubicado en el Laboratorio del Grupo de Investigación en Procesos Termoquímicos de la Universidad Nacional de Ingeniería.

B. Catalizadores

Se obtuvo un kg de catalizador fresco de craqueo catalítico fluidizado (FCC), así como dos kg de catalizador de equilibrio (E-Cat) de FCC. Dichas muestras fueron proporcionadas por una refinéncia de petróleo local. Asimismo,

se tomó un kg de la muestra del E-Cat para realizarle un proceso de deshidratación y calcinación, de esta forma se obtiene una muestra de E-Cat tratado.

En la Fig. 2 se muestran los catalizadores analizados. El catalizador fresco presenta un color blanco humo, el E-Cat tratado tiene un color plomo claro y el E-Cat sin tratar presenta un color plomo oscuro.



Fig. 2 Muestras de catalizadores (Izquierda: Catalizador fresco de FCC, Centro: E-Cat tratado, Derecha: E-Cat sin tratar)

C. Espectrometría Infrarroja por Transformadas de Fourier

Se determinó la estructura química de los residuos plásticos y de los catalizadores mediante la técnica de espectrometría infrarroja (FTIR) en un espectrofotómetro IRAffinity de Shimadzu acoplado con un ATR modelo MIRacle de Pike Technology. En el caso de los residuos plásticos se analizó el espectro de porcentaje de transmitancia (%T) de 60% hasta 120%, y en un rango de número de onda de 600 a 4000 cm^{-1} . Para las muestras de catalizadores, al estudio del espectro de porcentaje de transmitancia se le adicionó el estudio del espectro de absorbancia (A) en el rango de -0.1 hasta 0.2 con el mismo rango de número de onda.

D. Análisis termogravimétrico

Se realizó el análisis termogravimétrico para evaluar el comportamiento térmico de los residuos de plásticos y de los catalizadores, se empleó un analizador TGA 4000 de Perkin Elmer. Se tomó una submuestra de 20 mg con un tamaño de partícula menor a 2 mm, se usó una rampa de calentamiento de 30 °C hasta 800 °C a una velocidad de calentamiento de 20 °C/min, y con un flujo de nitrógeno de 20 ml/min para mantener una atmósfera inerte [19].

III. RESULTADOS

A. Análisis de espectrometría Infrarroja por Transformadas de Fourier (FTIR) a los residuos plásticos

Para la caracterización de las muestras de residuos plásticos, inicialmente se obtuvo los espectros FTIR de patrones de trabajo de residuos de polietileno de alta densidad (HDPE) y polipropileno (PP), estos patrones fueron obtenidos recolectando residuos plásticos donde este impreso el símbolo de reciclaje junto al número asignado internacionalmente, el número (2) para el HDPE y el número (5) para el PP, según lo establecido por la referencia [20]. En la Fig. 3 se presenta el

espectro FTIR del patrón de HDPE y en la Fig. 4 el espectro FTIR del patrón de PP.

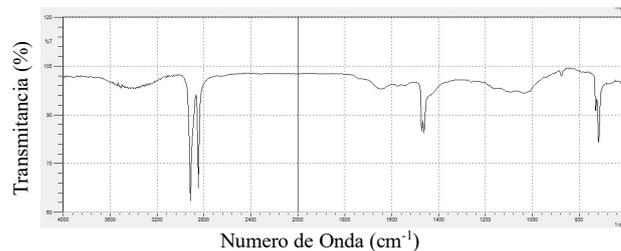


Fig. 3 Espectro FTIR (%T) de patrón de HDPE

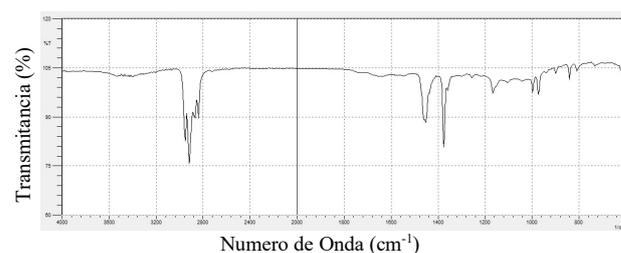


Fig. 4 Espectro FTIR (%T) del patrón de PP

Posteriormente se analizó mediante FTIR cada una de las muestras, los espectros FTIR de las muestras de residuos plásticos se presentan en la Fig. 5.

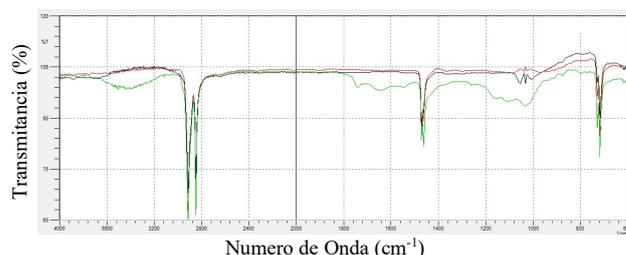


Fig. 5 Espectros FTIR (%T) de residuos plásticos (Azul: Muestra 1; Rojo: Muestra 2; Verde: Muestra 3)

Con los espectros FTIR de los patrones y de las muestras obtenidos, se realiza una comparación espectral para determinar de qué tipo de polímero base están compuestas las muestras.

B. Análisis FTIR a las muestras de catalizadores

Para la caracterización de las muestras de catalizador se realizó el análisis FTIR de porcentaje de transmitancia (%T) y el análisis FTIR de absorbancia (A). Los espectros FTIR de porcentaje de transmitancia y de absorbancia de las muestras de catalizadores —Catalizador fresco de FCC, E-Cat tratado y E-Cat sin tratar respectivamente— se muestran en la Fig. 6 y Fig. 7 respectivamente.

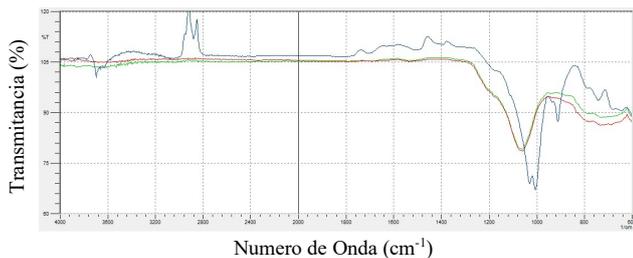


Fig. 6 Espectros FTIR (%T) de catalizadores (Azul: Catalizador fresco de FCC; Rojo: E-Cat tratado previamente; Verde: E-Cat sin tratar)

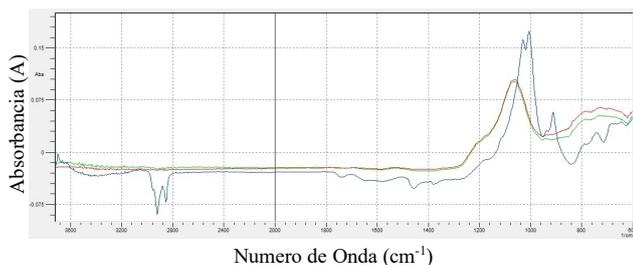


Fig. 7 Espectros FTIR (A) de catalizadores (Azul: Catalizador fresco de FCC; Rojo: E-Cat tratado previamente; Verde: E-Cat sin tratar)

C. Análisis termogravimétrico de residuos plásticos

Se realizó el análisis TG a las muestras de residuos plásticos con las condiciones ya mencionadas. En la Fig. 8 se presentan los termogramas obtenidos del TGA a las muestras 1, 2 y 3 de 30 °C a 800 °C. En la Fig. 9 se presenta las derivadas de los termogramas junto con la temperatura de máxima descomposición (picos en las gráficas).

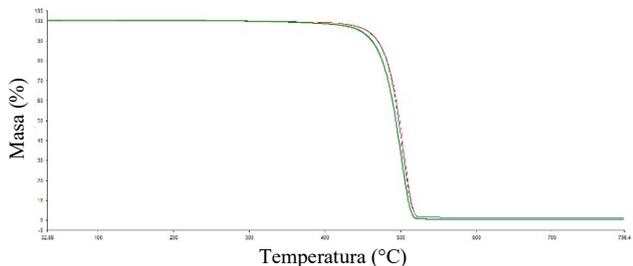


Fig. 8 TGA de residuos plásticos (Azul: Muestra 1; Rojo: Muestra 2; Verde: Muestra 3)

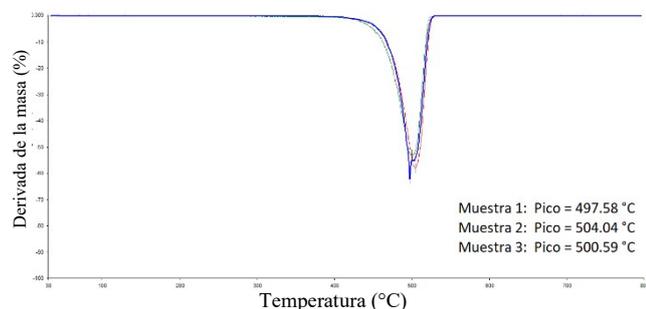


Fig. 9 Primera derivada de los termogramas de residuos plásticos (Azul: Muestra 1; Rojo: Muestra 2; Verde: Muestra 3)

D. Análisis termogravimétrico de catalizadores

Se realizó el análisis termogravimétrico a las muestras de catalizador. Dichas graficas se muestran con una resolución de porcentaje de masa desde 85 % a 105 % y una temperatura de 30 °C a 800 °C. En la Fig. 10 se presentan las gráficas obtenidas del análisis termogravimétrico de los catalizadores.

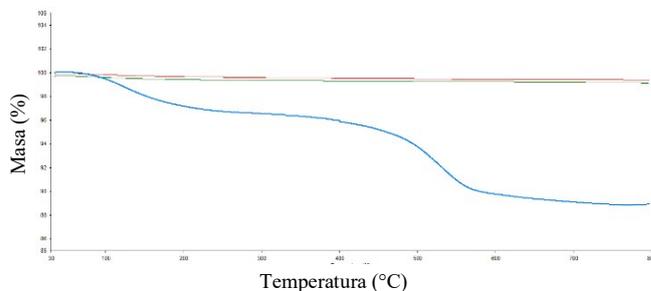


Fig. 10 Análisis de termogramas de catalizadores (Azul: Catalizador fresco de FCC; Rojo: E-Cat tratado; Verde: E-Cat sin tratar)

IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A. Caracterización de residuos plásticos por FTIR

En la Fig. 3, se presenta el espectro del patrón de HDPE obtenido del análisis FTIR, del cual se pueden notar dos picos característicos en 2900 cm^{-1} que representan una señal de alargamiento del enlace C-H con hibridación sp^3 , dos picos característicos entre 1500-1600 cm^{-1} que representan señales de deformación del enlace $-\text{CH}_2-$ con hibridación sp^3 y un pico característico entre 650-750 cm^{-1} que representan señales de balanceo del enlace $-\text{CH}_2-$ con hibridación sp^3 [21], [22].

En la Fig. 4 se presenta el espectro del patrón de PP obtenido mediante FTIR, las señales características presentes se encuentran entre 2800 cm^{-1} a 3000 cm^{-1} con tres picos que representan alargamiento del enlace C-H con hibridación sp^3 , un pico entre 1300-1400 cm^{-1} que representa señales de deformación del enlace $-\text{CH}_3-$, un pico entre 1400-1500 cm^{-1} que representa señales de deformación del enlace $-\text{CH}_2-$, un pico entre 1100-1200 cm^{-1} que representa un alargamiento del enlace C-C, deformación de enlaces C-H y un balance del enlace CH_3- , en el caso del pico cerca de 1000 cm^{-1} representa el balanceo del enlace C-H y la deformación de los enlaces C-H y CH_3- , el pico de 950-1000 cm^{-1} significa el balance del enlace CH_3- y el alargamiento del enlace C- CH_3 y los picos entre 800-900 cm^{-1} representan el balanceo del enlace CH_2- , alargamiento de los enlaces C-C, C- CH_3- , C- $\text{CH}-$ [21], [22].

En la Fig. 11 se comparan los resultados de los espectros FTIR de las muestras y el espectro FTIR del patrón de residuo de HDPE. Se observa que los picos de los tres espectros de las muestras y el espectro del patrón de HDPE se superponen, por lo tanto, se puede considerar que las muestras son residuos de HDPE.

Asimismo, se puede observar en la Fig. 11 que la muestra 1 y la muestra 2 tienen una transmitancia constante (cerca al 100 %) alrededor de 1000 cm^{-1} , mientras que la muestra 3 tiene una transmitancia menor (alrededor de 95 %) en el mismo número de onda (1000 cm^{-1}). Dichas diferencias pueden

deberse a los diferentes aditivos adicionados a cada una de las muestras [23].

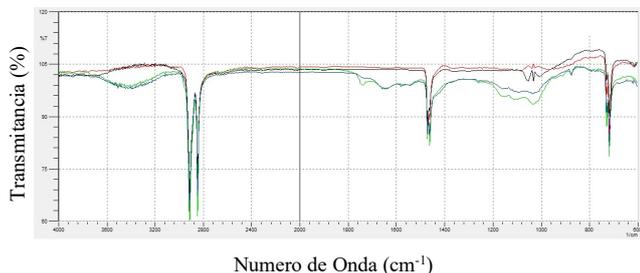


Fig. 11 Comparación de espectros FTIR (%) de residuos plásticos y patrón de HDPE (Negro: Patrón HDPE; Azul: Muestra 1; Rojo: Muestra 2; Verde: Muestra3)

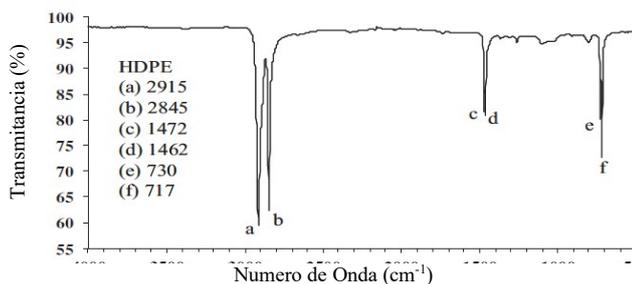


Fig. 12 Espectro FTIR (%T) del HDPE obtenido de la referencia [22]

En la Fig. 12 se muestra el espectro de una muestra de HDPE que investigó Jung [22] para validar el uso del FTIR más el ATR como medio de identificación de los polímeros usados, podemos apreciar que los picos característicos son similares a las muestras procesadas en esta investigación.

En la Fig. 13 se realiza la comparación del espectro FTIR del patrón de residuos de PP con los espectros FTIR de las muestras de residuos plásticos, donde se observa que los picos de las muestras no coinciden con las del patrón, corroborando que las muestras no son residuos de PP.

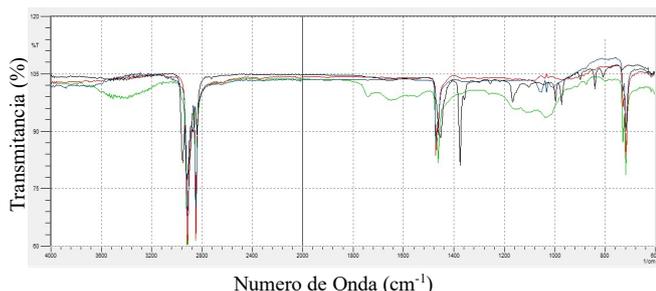


Fig. 13 Comparación de espectros FTIR de residuos plásticos y patrón de PP (Negro: Patrón PP; Azul: Muestra 1; Rojo: Muestra 2; Verde: Muestra3)

B. Caracterización de catalizadores por FTIR

En la Fig. 6 y la Fig. 7 se comparan los espectros FTIR (% T) y FTIR (A) respectivamente para las tres muestras de catalizadores, se observa que el catalizador fresco tiene una estructura distinta a las otras dos muestras de E-Cat, esto

debido a que el E-Cat ha sufrido daño en su estructura y propiedades durante el proceso de craqueo y regeneración en la refinería de petróleo [24].

En el caso del espectro FTIR (% T) se observa que el catalizador fresco de FCC presenta una señal con dos picos en 1000 y 1050 cm^{-1} y otra señal corta a 900 cm^{-1} aproximadamente, que representan la vibración de alargamiento de los enlaces Si-O-Si de la estructura del catalizador [25]. Asimismo, la forma y los demás pequeños picos que se observan de 650 a 1750 cm^{-1} aproximadamente determinan que es una zeolita [26].

En los espectros FTIR (A), se puede apreciar que el E-Cat tratado y el E-Cat sin tratar tienen una estructura similar a excepción del tramo de 600 cm^{-1} a 900 cm^{-1} (el E-Cat tratado tiene una absorbancia ligeramente mayor en ese rango comparado con el E-Cat sin tratar.) esto podría ser debido a que el E-Cat tratado previamente ya no cuenta con coque ni impurezas en su estructura [3], por lo tanto las señales al incidir la radiación infrarroja pueden ser obtenidas más fácilmente, teniéndose más intensidad en ellas [27]. Asimismo, se apreció una señal en 750 cm^{-1} aproximadamente que representa las vibraciones de enlaces T-O-T con las moléculas tetraédricas de SiO_4 y AlO_4 y un pico alrededor de 1100 cm^{-1} que representa las vibraciones de estiramiento asimétrico de enlaces T-O-T de las moléculas tetraédricas de SiO_4 y AlO_4 , por lo que se podría considerar que el catalizador aún podría contar con sitios ácidos y por lo tanto con actividad catalítica debido a la presencia de Si y Al [24], asimismo los espectros del E-Cat (tratado y sin tratar) coinciden con la referencia [28].

C. Comportamiento termogravimétrico de residuos plásticos por TGA

En la Fig. 8, se analizan las gráficas de los termogramas obtenidos por TGA de cada una de las muestras y en la Fig. 9 se analizan las derivadas de dichos termogramas, de las cuales se observa que el termograma de la muestra 1 (con una temperatura máxima de descomposición de 497.58 $^{\circ}\text{C}$ y un residuo a 800 $^{\circ}\text{C}$ de 0.4 %) y la muestra 2 (con una temperatura máxima de descomposición de 504.04 $^{\circ}\text{C}$ y un residuo a 800 $^{\circ}\text{C}$ de 0.6 %) prácticamente se superponen, mientras que la gráfica de muestra 3 (con una temperatura máxima de descomposición de 500.59 $^{\circ}\text{C}$ y un residuo a 800 $^{\circ}\text{C}$ de 1.4 %) esta desplaza un poco a la izquierda. De los resultados se observa que la muestra 1 y muestra 2 tienen el mismo comportamiento termogravimétrico, mientras que la muestra 3 tiene un comportamiento un poco distinto a las primeras, esta puede deberse a los aditivos que se le adicionado a la muestra 3, ya que la referencias mencionan que se le adicionan aditivos en función al tipo de uso que se le da a cada plástico [23].

En la Fig. 8 se muestra que prácticamente todas las muestras se degradan en forma similar y que, a 550 $^{\circ}\text{C}$ la pérdida de masa se ha estabilizado. Este comportamiento indica un buen rendimiento en productos líquidos y gaseosos,

dando a las muestras de residuos plásticos analizadas un gran potencial para su uso en procesos termoquímicos.

D. Comportamiento termogravimétrico de catalizadores por TGA

En la Fig. 10, se analizan las gráficas TGA de cada uno de los catalizadores, en la cual se puede notar que el E-Cat tratado y el E-Cat sin tratar tienen un comportamiento similar (con poca pérdida de masa en el proceso) a pesar de que el E-Cat sin tratar pierde más masa que el E-Cat tratado, mientras que el Catalizador fresco de FCC pierde masa en todo el proceso, aproximadamente un 15 %.

La diferencia entre la pérdida de masa entre E-Cat tratado y el E-Cat sin tratar puede deberse a que el E-Cat sin tratar aun contiene coque en sus poros, el cual va perdiendo al aumentar la temperatura, mientras que el E-Cat tratado no contiene coque. Asimismo, la pérdida de masa en el catalizador fresco puede deberse a que el catalizador va perdiendo humedad según va aumentando la temperatura. Asimismo, algunas investigaciones mencionan que el catalizador al ser expuesto a altas temperaturas empieza a perder parte de sus propiedades texturales y de forma [3], [29], [30], [31].

V. CONCLUSIONES

Se concluye que las muestras de residuos plásticos son muestras de HDPE, siendo las muestras 1 y 2 muy similares en comportamiento termogravimétrico, mientras la muestra 3 tiene un comportamiento termogravimétrico ligeramente distinto. Además, se concluye que a pesar de ser el mismo residuo (HDPE para los tres casos) la presencia de aditivos puede afectar el comportamiento termogravimétrico de la muestra por lo que se recomienda realizar un análisis FTIR y un análisis termogravimétrico a cada muestra de residuo plástico previo a la realización del proceso de pirólisis.

Se concluye que el E-Cat tratado tiene un comportamiento termogravimétrico similar al E-Cat sin tratar, asimismo aún cuenta con actividad catalítica debido a la presencia de sitios ácidos (Por la presencia Si y Al en su estructura). Por lo que es posible su uso como catalizador para procesos termoquímicos de residuos plásticos.

AGRADECIMIENTOS

Los Investigadores agradecen al Grupo de Investigación en Procesos Termoquímicos por el apoyo experimental e intelectual en el proyecto, asimismo agradecen a la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de Petróleo, Gas Natural y Petroquímica de la Universidad Nacional de Ingeniería por el financiamiento del proyecto.

REFERENCIAS

[1] Exploplast Perú, "Inicios de la industria plástica nacional | Plast Perú Digital Noticia 2017," 2017. [Online]. Available: <http://expoplastperu.com/plastnews/inicios-de-la-industria-plastica-nacional-32/>. [Accessed: 10-Oct-2018].

[2] M. Cortez and N. Mercedes, "Análisis de las condiciones de trabajo y

su impacto en el clima laboral de los operadores del área de producción en las empresas manufactureras de plástico en Lima. Propuesta de un plan de mejora del clima laboral en la empresa Melafarm SAC.," Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), 2017.

[3] W. Ramos, V. Pretell, and C. Lujan, "Pirólisis Catalítica de Residuos de Polipropileno para la Obtención de Combustibles Líquidos," in *Proceedings of the 17th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: "Industry, Innovation, and Infrastructure for Sustainable Cities and Communities,"* 2019, no. July, pp. 24–26.

[4] Universidad de Piura, "Los Plásticos y La industria del Plástico en el Perú (Capítulo 1)," 1, p. 20, 2004.

[5] D. Ashworth, P. Elliott, and M. Toledano, "Waste incineration and adverse birth and neonatal outcomes: A systematic review," *Environ. Int.*, vol. 69, pp. 120–132, 2014.

[6] Asociación Peruana de Industria Plástica, "Situación de la Industria Plástica en el Perú. Importaciones de Materia Prima de los últimos seis años," 2017.

[7] "Perú: El 90% del reciclaje de plásticos es informal | Sophimania." [Online]. Available: <https://sophimania.pe/medio-ambiente/contaminacion-y-salud-ambiental/pera-el-90-del-reciclaje-de-plasticos-es-informal/>. [Accessed: 10-Oct-2018].

[8] ICIS, "Chemical Prices -Polypropylene Europe," 2017.

[9] Asociación Peruana de Industria Plástica, "Reporte Estadístico De Importación De Materia Prima -Octubre 2017," 2017.

[10] Sociedad Nacional de Industrias, "Guía de la Industria Plástica," 2017. [Online]. Available: <http://plastic-concept.com/Guia-de-la-Industria-Plastica/>. [Accessed: 11-Feb-2019].

[11] Asociación Peruana de Industria Plástica, "Reporte Estadístico De Importación De Productos Terminados -Octubre 2018," 2018.

[12] Y. Guo, "Polyethylene Terephthalate (Asia Pacific)," no. January, pp. 1–2, 2014.

[13] Linda Naylor, "Polyethylene (Europe)," no. February, p. 5, 2014.

[14] A. Demirbas, "Pyrolysis of municipal plastic wastes for recovery of gasoline-range hydrocarbons," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 72, no. 1, pp. 97–102, 2004.

[15] D. Uriarte, "Experimentación de la obtención de combustibles líquidos a partir de polietileno de alta densidad," Universidad Nacional de Ingeniería, 2018.

[16] W. Ramos, "Obtención de combustibles líquidos a partir de residuos de polipropileno.," Universidad Nacional de Ingeniería, 2017.

[17] V. Pretell, "Pirólisis Rápida de Biomasa de Palma Africana y Caña de Azúcar para la obtención de Bio-Petroleo." Lima, 2013.

[18] A. Strubinger, F. Morales, and K. Aponte, "Environmental risk and use of FCC spent catalyst in mortars mixtures," *Rev. la Fac. Ing.*, vol. 29, no. 4, pp. 93–106, 2014.

[19] V. Pretell and R. Erazo, "Evaluación de las Propiedades Físicoquímicas y Termogravimétricas de Tres Biomásas Peruanas para su uso Energético," in *Proceedings of the 17th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: "Industry, Innovation, and Infrastructure for Sustainable Cities and Communities,"* 2019, no. July, pp. 24–26.

[20] Y. Guardado, "Origen y significado de los símbolos de reciclaje," *Bioma*, vol. 1, no. 3, pp. 37–38, 2013.

[21] B. Adaniya, *Técnicas de espectroscopia Infrarrojo, Resonancia Magnética Nuclear, Espectroscopia de Masa y Ultravioleta -Sensible*. Lima, 1997.

[22] M. R. Jung *et al.*, "Validation of ATR FT-IR to identify polymers of plastic marine debris, including those ingested by marine organisms," *Marine Pollution Bulletin*, vol. 127, pp. 704–716, 2018.

[23] M. Cherif Lahimer, N. Ayed, J. Horriche, and S. Belgaied, "Characterization of plastic packaging additives: Food contact, stability and toxicity," *Arab. J. Chem.*, vol. 10, pp. S1938–S1954, 2017.

[24] S. Reza, *Fluid Catalytic Cracking Handbook*, Third Edit. 2014.

[25] D. Bhuyan, K. Selvaraj, and L. Saikia, "Pd@SBA-15 nanocomposite catalyst: Synthesis and efficient solvent-free semihydrogenation of phenylacetylene under mild conditions," *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 241, no. December, pp. 266–273, 2017.

[26] J. Goetze, "Spectroscopic studies on the formation of coke on

- individual Fluid Catalytic Cracking particles: the effect of poisoning metal compounds,” no. 3018458, 2013.
- [27] Q. Almas *et al.*, “Transformations of FCC catalysts and carbonaceous deposits during repeated reaction-regeneration cycles,” *Catal. Sci. Technol.*, no. i, pp. 6977–6992, 2019.
- [28] C. Costa, C. Ferreira, and M. Ribeiro, “Alkali-Activated Binders Produced From Petrochemical Fluid Catalytic Cracking Catalyst Waste,” *Int. J. Res. Eng. Technol.*, vol. 03, no. 25, pp. 114–122, 2014.
- [29] S. Haitao, D. Zhijian, Z. Yuxia, and T. Huiping, “Effect of coke deposition on the remaining activity of FCC catalysts during gas oil and residue cracking,” *Catal. Commun.*, vol. 16, no. 1, pp. 70–74, 2011.
- [30] M. Bertero, J. R. García, M. Falco, and U. Sedran, “Equilibrium FCC catalysts to improve liquid products from biomass pyrolysis,” *Renew. Energy*, 2018.
- [31] R. Miandad, M. Barakat, A. S. Aburizaiza, M. Rehan, and A.-S. Nizami, “Catalytic pyrolysis of plastic waste: A review,” *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 102, no. June, pp. 822–838, 2016.