

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD
CATÓLICA DEL PERÚ**

Escuela de Posgrado



Estudio del pulverizado de termoplásticos reciclados para la
fabricación de materiales compuestos mediante
moldeo rotacional

Tesis para obtener el grado académico de Maestro en Ingeniería y
Ciencia de los Materiales que presenta:

David Orlando Sagastegui Calderon

Asesor:

Julio Arnaldo Acosta Sullcahuamán


Lima, 2025

Informe de Similitud

Yo, Julio Arnaldo Acosta Sullcahuamán, docente de la Escuela de Posgrado de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis titulada “**Estudio del pulverizado de termoplásticos reciclados para la fabricación de materiales compuestos mediante moldeo rotacional**”, del autor David Orlando Sagastegui Calderón, código PUCP: 20234450, alumno de la Maestría en Ingeniería y Ciencia de los Materiales, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 9%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 07/09/2025.
- He revisado con detalle dicho reporte de la Tesis y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lima, 10 de septiembre de 2025.

Acosta Sullcahuamán, Julio Arnaldo	
DNI: 07960574	Firma: 
ORCID: 0000-0002-1518-4282	



DEDICATORIA

Este trabajo es dedicado a mi familia, quienes me han brindado su apoyo incondicional en los momentos más difíciles. Además, agradecer a mis compañeros de la maestría y laboratorio, por su aliento y apoyo para llegar a alcanzar mis objetivos en la vida.

David Sagástegui

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a Dios, quien me brinda el soporte y sabiduría para no decaer en el sendero de la vida y los sueños. En ese sentido agradecer a mi asesor Dr. Julio Acosta por el apoyo, dedicación y amistad brindados en la elaboración de este trabajo durante este tiempo.

Adicionalmente, agradecer a mi familia y compañeros de la maestría, porque su apoyo emocional ha sido vital en el desarrollo de esta presente investigación.

Mis agradecimientos especiales a PROCENCIA del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONCYTEC) por el financiamiento del proyecto PE501079535-2022: “Desarrollo de materiales compuestos de plástico reciclado y madera recuperada fabricados mediante moldeo rotacional de capas múltiples”. Convocatoria: Proyectos de Investigación Básica y Aplicada.

RESUMEN

El reciclaje de materiales termoplásticos se ha vuelto crucial en la industria de los materiales debido al incremento de residuos plásticos y sus efectos perjudiciales sobre el ambiente. En este contexto, el pulverizado surge como una alternativa viable, al permitir transformar residuos en polvos reutilizables con características adecuadas para nuevos procesos. Estudios previos han demostrado que factores como la forma, el tamaño de partícula, la temperatura de molienda y la configuración del equipo influyen directamente en la calidad del polvo y en el rendimiento de aplicaciones como el moldeo rotacional. Esta investigación responde a dicha problemática proponiendo una solución técnica que mejora la reciclabilidad de los termoplásticos y promueve prácticas sostenibles en la industria.

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar el pulverizado de termoplásticos reciclados que serán empleados como materiales alternativos para la fabricación de materiales compuestos de termoplásticos reciclados o recuperados mediante moldeo rotacional.

La metodología consideró el uso de materiales termoplásticos reciclados o recuperados, como HDPE proveniente de tapas de botellas recicladas, así como PVC rígido y poliestireno de alto impacto (HIPS) recuperados de los procesos de fabricación de una empresa dedicada a productos plásticos. El diseño experimental propuesto consideró variables como la temperatura, el espaciamiento entre discos de corte (mínimo, medio y grueso), la velocidad del motor (RPM) y la velocidad de alimentación (V_f). Posteriormente, se realizaron pruebas bajo condiciones controladas y se caracterizaron los polvos obtenidos mediante ensayos como: FTIR, granulometría, SEM, índice de fluidez y densidad aparente; para evaluar el comportamiento del polvo bajo diferentes condiciones de procesamiento y, en particular, en aplicaciones de moldeo rotacional. Los materiales se identificaron a través de ensayos de FTIR, mientras que la densidad aparente permitió detectar variaciones en la compactación de las partículas y con el análisis SEM se observó si presentaban una estructura adecuada según lo descrito en la literatura.

El estudio del pulverizado de los plásticos reciclados o recuperados: HDPE, HIPS y PVC rígido, evidenció que la eficiencia del proceso está directamente condicionada por la interacción entre el espaciamiento entre discos, la velocidad de alimentación y las RPM del motor. Las condiciones de pulverizado que generen polvos con características óptimas para ser utilizados en el proceso de moldeo rotacional, son: **HDPE**: mínimo espaciamiento (0.3 mm), 100 % RPM y 100 % V_f ; **HIPS**: espaciamiento medio (0.6 mm), 100 % RPM y 100 % V_f ; y **PVC rígido**: mínimo espaciamiento (0.3 mm), 100 % RPM y 100 % V_f .

ABSTRACT

The recycling of thermoplastic materials has become a critical priority in the materials industry due to the increasing volume of plastic waste and its detrimental environmental impact. In this context, pulverization emerges as a viable alternative, enabling the transformation of waste into reusable powders with properties suitable for new manufacturing processes. Previous studies have demonstrated that factors such as particle shape, particle size, milling temperature, and equipment configuration directly influence powder quality and the performance of applications such as rotational molding. This research addresses this issue by proposing a technical solution aimed at improving the recyclability of thermoplastics while promoting sustainable industrial practices.

The present work aims to investigate the pulverization of recycled thermoplastics for use as alternative feedstock in the production of composite materials from recycled or recovered thermoplastics through rotational molding.

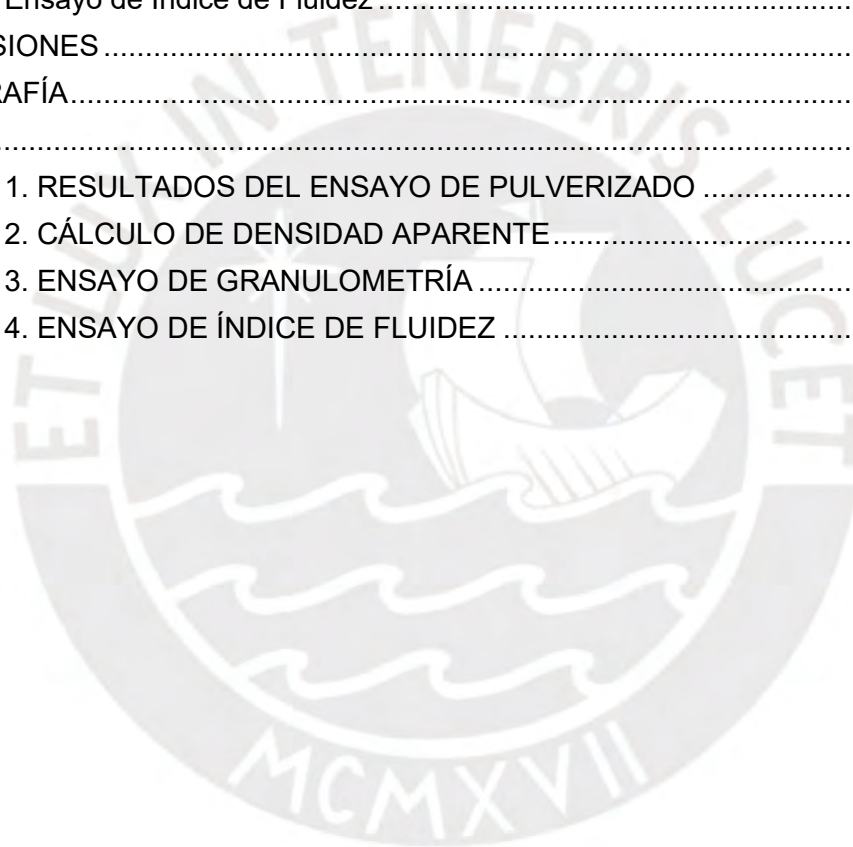
The methodology involved the use of recycled or recovered thermoplastics, including HDPE obtained from recycled bottle caps, as well as rigid PVC and high-impact polystyrene (HIPS) recovered from the manufacturing processes of a plastic products company. The experimental design considered variables such as milling temperature, cutting disc spacing (minimum, medium, and coarse), motor speed (RPM), and feed rate (V_f). Controlled trials were then conducted, and the resulting powders were characterized through tests including FTIR, particle size analysis, SEM, melt flow index, and bulk density measurements to evaluate powder behavior under different processing conditions, particularly in rotational molding applications. Materials were identified by FTIR, while bulk density measurements enabled the detection of particle compaction variations, and SEM analysis was used to assess the suitability of particle morphology according to literature standards.

The study on the pulverization of recycled or recovered plastics—HDPE, HIPS, and rigid PVC—showed that process efficiency is directly determined by the interaction between disk spacing, feed rate, and motor RPM. The pulverization conditions that produce powders with optimal characteristics for use in the rotational molding process are as follows: HDPE: minimum spacing (0.3 mm), 100 % RPM, and 100 % feed rate; HIPS: medium spacing (0.6 mm), 100 % RPM, and 100 % feed rate; and rigid PVC: minimum spacing (0.3 mm), 100 % RPM, and 100 % feed rate.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I.....	4
ESTADO DE LA TECNOLOGÍA	4
1.1. ANTECEDENTES.....	4
1.2. MATERIALES POLIMÉRICOS	6
1.3. RECUPERACIÓN Y RECICLAJE DE MATERIALES TERMOPLÁSTICOS	8
1.3.1. Tipos de reciclado	9
1.3.2. Proceso de reciclado	11
1.4. PROCESO DE PULVERIZADO.....	12
1.4.1. Parámetros del proceso.....	13
1.4.2. Caracterización de polvos.....	14
1.5. PROCESO DE MOLDEO ROTACIONAL	15
1.5.1. Secuencia operativa del moldeo rotacional.....	15
1.5.2. Moldeo rotacional de materiales compuestos de plástico y madera.....	16
CAPÍTULO II.....	18
METODOLOGÍA.....	18
2.1. MATERIALES.....	18
2.1.1. HDPE (Polietileno de alta densidad).....	18
2.1.2. HIPS (Poliestireno de alto impacto)	18
2.1.3. PVC rígido (Policloruro de vinilo)	19
2.2. EQUIPOS	20
2.3. PROCESO DE PULVERIZACIÓN	21
2.4. DISEÑO EXPERIMENTAL	22
2.5. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN.....	23
2.5.1. Densidad aparente	23
2.5.2. Granulometría.....	24
2.5.3. Microscopía Electrónica de Barrido	25
2.5.4. Fluidez.....	26
CAPÍTULO III.....	28
RESULTADOS Y ANÁLISIS	28
3.1. HDPE (POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD).....	28
3.1.1. Ensayo de FTIR.....	28
3.1.2. Pulverizado de material.....	29
3.1.3. Ensayo de Densidad Aparente.....	30
3.1.4. Ensayo de SEM	31
3.1.5. Ensayo de Granulometría	33
3.1.6. Ensayo de Índice de Fluidez	34
3.2. HIPS (POLIESTIRENO DE ALTO IMPACTO)	35
3.2.1. Ensayo de FTIR.....	35

3.2.2. Pulverizado de material.....	36
3.2.3. Ensayo de Densidad Aparente.....	37
3.2.4. Ensayo de SEM	39
3.2.5. Ensayo de Granulometría	41
3.2.6. Ensayo de Índice de Fluidéz	42
3.3. PVC RÍGIDO (POLICLORURO DE VINILO RÍGIDO)	44
3.3.1. Ensayo de FTIR.....	44
3.3.2. Pulverizado de material.....	45
3.3.2. Ensayo de Densidad Aparente.....	47
3.3.3. Ensayo de SEM	48
3.3.4. Ensayo de Granulometría	50
3.3.5. Ensayo de Índice de Fluidéz	52
CONCLUSIONES	54
BIBLIOGRAFÍA.....	56
ANEXO	62
ANEXO 1. RESULTADOS DEL ENSAYO DE PULVERIZADO	62
ANEXO 2. CÁLCULO DE DENSIDAD APARENTE.....	65
ANEXO 3. ENSAYO DE GRANULOMETRÍA	67
ANEXO 4. ENSAYO DE ÍNDICE DE FLUIDEZ	86



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de los polímeros y su estructura esquemática (Aldousiri et al, 2013; Vashchuk et al., 2018)	8
Figura 2. Proceso de reciclado (Vásquez, Espinosa, Beltrán, & Velasco, 2014)	9
Figura 3. Reciclado químico: Polimerización y despolimerización (AIMPLAS, 2022)	9
Figura 4. Esquema del reciclado energético del plástico (Ecoplas, 2017)	10
Figura 5. Esquema del reciclado mecánico de plásticos (Castaño, 2024).....	10
Figura 6. A. Máquina Pulverizadora (WEDO MACHINERY, s.f) B. Polvos plásticos pulverizados	13
Figura 7.A. Proceso de moldeo rotacional (Fuente: Laboratorio de Investigación N°4) B. Muestras cilíndricas de material compuesto de plástico y madera (Arribasplata-Seguin et al., 2021).....	17
Figura 8. Tapas recicladas de HDPE (Recycled Polymers, 2020).....	18
Figura 9. Envase de yogurt a base de polystyrol (Bioplásticos, 2014).....	19
Figura 10. Rollos de láminas planas de PVC rígido (Myers, 2020).....	19
Figura 11. Equipo de trituración de material (Fuente: Propia)	20
Figura 12. Procedimiento de la pulverización (Fuente: Propia)	22
Figura 13. Aparato para prueba de densidad aparente, método A (ASTM, 2017)	24
Figura 14. Vibratory Sieve Shaker AS 200 basic (Retsch, 2024)	25
Figura 15. Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) – Pontificia Universidad Católica del Perú	25
Figura 16. Plastómetro de extrusión: A. Extrusión preliminar. B. Aplicación de carga - Pontificia Universidad Católica del Perú.....	26
Figura 17. Espectrómetro infrarrojo Tensor 27- Pontificia Universidad Católica del Perú	27
Figura 18. Curva de absorción FTIR correspondiente al HDPE reciclado	28
Figura 19. Cantidad de material no pulverizado por condición de operación - HDPE..	30
Figura 20. Valores de Densidad Aparente (g/cm ³) por condición de análisis - HDPE .	31
Figura 21. SEM de partículas HDPE – primer espaciamiento: A. 25x (10kV) B. 45x (10kV) C. 50x (10kV) D. 80x (10kV) E. 200x (10kV) F. 200x (12.5kV) G. 300x (10kV) H. 400x (12.5kV)	32
Figura 22. SEM de partículas HDPE - segundo espaciamiento: A. 25x (10kV) B. 45x (10kV) C. 50x (10kV) D. 80x (10kV) E. 200x (10kV) F. 300x (10kV) G. 400x (10kV) H. 600x (10kV)	32

Figura 23. SEM de partículas HDPE - tercer espaciamento: A. 25x (10kV) B. 45x (10kV) C. 80x (10kV) D. 100x (10kV) E. 180x (10kV) F. 200x (10kV) G. 400x (10kV) H. 600x (10kV).....	33
Figura 24. Curva de distribución granulométrica - HDPE: A.e1,100% RPM, 100%Vf. B. e2,100% RPM,100%Vf. C.e3,100%RPM,100%Vf.....	34
Figura 25. Valores promedio de índice de fluidez (g/10min)- HDPE.....	35
Figura 26. Curva de absorción FTIR correspondiente al HIPS recuperado	36
Figura 27 Cantidad de material no pulverizado por condición de operación - HIPS.	37
Figura 28.Valores de Densidad Aparente (g/cm ³) por condición de análisis – HIPS...	38
Figura 29.SEM de partículas HIPS - primer espaciamento: A. 25x (10kV) B. 40x (10kV) C. 50x (10kV) D. 80x (10kV) E. 200x (10kV) F. 200x (10kV).....	39
Figura 30.SEM de partículas HIPS - segundo espaciamento: A. 25x (10kV) B. 45x (10kV) C. 50x (10kV) D. 200x (10kV).....	40
Figura 31.SEM de partículas HIPS - tercer espaciamento: A. 25x (10kV) B. 45x (10kV) C. 50x (10kV) D. 80x (10kV) E. 160x (10kV) F. 400x (10kV).....	41
Figura 32.Curva de distribución granulométrica - HIPS: A.e1,100% RPM, 100%Vf. B. e2,100% RPM,100%Vf. C.e3,75%RPM,75%Vf.....	42
Figura 33. Valores promedio de índice de fluidez (g/10min)- HIPS	44
Figura 34.Curva de absorción FTIR correspondiente al PVC recuperado	45
Figura 35.Cantidad de material no pulverizado por condición de operación – PVC	46
Figura 36. Valores de Densidad Aparente (g/cm ³) por condición de análisis - PVC rígido	48
Figura 37.SEM de partículas PVC - primer espaciamento: A. 25x (12.5kV) B. 45x (12.5kV) C. 50x (12.5kV) D. 80x (12.5kV) E. 160x (12.5kV) F. 400x (10kV).....	49
Figura 38. SEM de partículas PVC - segundo espaciamento: A. 25x (15kV) B. 45x (15kV) C. 80x (15kV) D. 200x (12.5kV).....	49
Figura 39.SEM de partículas PVC - tercer espaciamento: A. 25x (12.5kV) B. 45x (12.5kV) C. 50x (12.5kV) D. 80x (12.5kV) E. 200x (12.5kV) F. 400x (10kV).....	50
Figura 40.Curva de distribución granulométrica - PVC: A.e1,100% RPM, 100%Vf. B. e2,100% RPM,100%Vf. C.e3,75%RPM,75%Vf.....	52
Figura 41. Valores promedio de Índice de Fluidez (g/10 min) - PVC	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Parámetros Técnicos Principales de la Pulverizadora (Wanrooe Machinery Co., LTD, 2024).....	21
Tabla 2. Parámetros de Temperatura sugeridos por el proveedor (Wanrooe Machinery Co., LTD, 2024)	21
Tabla 3. Configuración de los parámetros en el pulverizado (Fuente: Propia)	23
Tabla 4. Pulverizado de material HDPE con espaciamento máximo	62
Tabla 5. Pulverizado de material HDPE con espaciamento intermedio	62
Tabla 6 Pulverizado del material HDPE con espaciamento mínimo.	62
Tabla 7.Pulverizado de material HIPS con espaciamento máximo.....	63
Tabla 8. Pulverizado de material HIPS con espaciamento intermedio.....	63
Tabla 9 Pulverizado del material HIPS con espaciamento mínimo.....	63
Tabla 10. Pulverizado de material PVC rígido con espaciamento máximo	64
Tabla 11. Pulverizado de material PVC rígido con espaciamento intermedio	64
Tabla 12. Pulverizado del material PVC rígido con espaciamento mínimo.	64
Tabla 13. Valores de Densidad Aparente por condición de operación -HDPE	65
Tabla 14.Valores de Densidad Aparente por condición de operación -HIPS.....	65
Tabla 15.Valores de Densidad Aparente por condición de operación - PVC.....	66
Tabla 16. Porcentaje de material HDPE acumulado & Dm - 1.2 mm, 100% RPM, 100% Vf.....	67
Tabla 17.Porcentaje de material HDPE acumulado & Dm - 1.2 mm, 100% RPM, 75% Vf	67
Tabla 18.Porcentaje de material HDPE acumulado & Dm - 1.2 mm, 75% RPM, 100% Vf	67
Tabla 19.Porcentaje de material HDPE acumulado & Dm - 1.2 mm, 75% RPM, 75% Vf	68
Tabla 20.Porcentaje de material HDPE acumulado & Dm - 1.2 mm, 50% RPM, 100% Vf	68
Tabla 21.Porcentaje de material HDPE acumulado & Dm - 1.2 mm, 50% RPM, 75% Vf	68
Tabla 22.Porcentaje de material HDPE acumulado & Dm - 0.6 mm, 100% RPM, 100% Vf.....	69
Tabla 23.Porcentaje de material HDPE acumulado & Dm - 0.6 mm, 100% RPM, 75% Vf	69

Tabla 24. Porcentaje de material HDPE acumulado & Dm - 0.6 mm, 75% RPM, 100% Vf	69
Tabla 25. Porcentaje de material HDPE acumulado & Dm - 0.6 mm, 75% RPM, 75% Vf	70
Tabla 26. Porcentaje de material HDPE acumulado & Dm - 0.6 mm, 50% RPM, 100% Vf	70
Tabla 27. Porcentaje de material HDPE acumulado & Dm - 1.2 mm, 50% RPM, 75% Vf	70
Tabla 28. Porcentaje de material HDPE acumulado & Dm - 0.3 mm, 100% RPM, 100% Vf	71
Tabla 29. Porcentaje de material HDPE acumulado & Dm - 0.3 mm, 100% RPM, 75% Vf	71
Tabla 30. Porcentaje de material HDPE acumulado & Dm - 0.3 mm, 75% RPM, 100% Vf	71
Tabla 31. Porcentaje de material HDPE acumulado & Dm - 0.3 mm, 75% RPM, 75% Vf	72
Tabla 32. Porcentaje de material HDPE acumulado & Dm - 0.3 mm, 50% RPM, 100% Vf	72
Tabla 33. Porcentaje de material HDPE acumulado & Dm - 0.3 mm, 50% RPM, 75% Vf	72
Tabla 34. Porcentaje de material HIPS acumulado & Dm - 1.2 mm, 100% RPM, 100% Vf	73
Tabla 35. Porcentaje de material HIPS acumulado & Dm - 1.2 mm, 100% RPM, 75% Vf	73
Tabla 36. Porcentaje de material HIPS acumulado & Dm - 1.2 mm, 75% RPM, 100% Vf	74
Tabla 37. Porcentaje de material HIPS acumulado & Dm - 1.2 mm, 75% RPM, 75% Vf	74
Tabla 38. Porcentaje de material HIPS acumulado & Dm - 1.2 mm, 50% RPM, 100% Vf	74
Tabla 39. Porcentaje de material HIPS acumulado & Dm - 1.2 mm, 50% RPM, 75% Vf	75
Tabla 40. Porcentaje de material HIPS acumulado & Dm - 0.6 mm, 100% RPM, 100% Vf	75
Tabla 41. Porcentaje de material HIPS acumulado & Dm - 0.6 mm, 100% RPM, 75% Vf	75

Tabla 42. Porcentaje de material HIPS acumulado & Dm - 0.6 mm, 75% RPM, 100% Vf	76
Tabla 43. Porcentaje de material HIPS acumulado & Dm - 0.6 mm, 75% RPM, 75% Vf	76
Tabla 44. Porcentaje de material HIPS acumulado & Dm - 0.6 mm, 50% RPM, 100% Vf	76
Tabla 45. Porcentaje de material HIPS acumulado & Dm - 0.6 mm, 50% RPM, 75% Vf	77
Tabla 46. Porcentaje de material HIPS acumulado & Dm - 0.3 mm, 100% RPM, 100% Vf	77
Tabla 47. Porcentaje de material HIPS acumulado & Dm - 0.3 mm, 100% RPM, 75% Vf	77
Tabla 48. Porcentaje de material HIPS acumulado & Dm - 0.3 mm, 75% RPM, 100% Vf	78
Tabla 49. Porcentaje de material HIPS acumulado & Dm - 0.3 mm, 75% RPM, 75% Vf	78
Tabla 50. Porcentaje de material HIPS acumulado & Dm - 0.3 mm, 50% RPM, 100% Vf	78
Tabla 51. Porcentaje de material HIPS acumulado & Dm - 0.3 mm, 50% RPM, 75% Vf	79
Tabla 52. Porcentaje de material PVC rígido acumulado & Dm - 1.2 mm, 100% RPM, 100% Vf	79
Tabla 53. Porcentaje de material PVC rígido acumulado & Dm - 1.2 mm, 100% RPM, 75% Vf	80
Tabla 54. Porcentaje de material PVC rígido acumulado & Dm - 1.2 mm, 75% RPM, 100% Vf	80
Tabla 55. Porcentaje de material PVC rígido acumulado & Dm - 1.2 mm, 75% RPM, 75% Vf	80
Tabla 56. Porcentaje de material PVC rígido acumulado & Dm - 1.2 mm, 50% RPM, 100% Vf	81
Tabla 57. Porcentaje de material PVC rígido acumulado & Dm - 1.2 mm, 50% RPM, 75% Vf	81
Tabla 58. Porcentaje de material PVC rígido acumulado & Dm - 0.6 mm, 100% RPM, 100% Vf	81
Tabla 59. Porcentaje de material PVC rígido acumulado & Dm - 0.6 mm, 100% RPM, 75% Vf	82

Tabla 60. Porcentaje de material PVC rígido acumulado & Dm - 0.6 mm, 75% RPM, 100% Vf.....	82
Tabla 61. Porcentaje de material PVC rígido acumulado & Dm - 0.6 mm, 75% RPM, 75% Vf.....	82
Tabla 62. Porcentaje de material PVC rígido acumulado & Dm - 0.6 mm, 50% RPM, 100% Vf.....	83
Tabla 63. Porcentaje de material PVC rígido acumulado & Dm - 0.6 mm, 50% RPM, 75% Vf.....	83
Tabla 64. Porcentaje de material PVC rígido acumulado & Dm - 0.3 mm, 100% RPM, 100% Vf.....	83
Tabla 65. Porcentaje de material PVC rígido acumulado & Dm - 0.3 mm, 100% RPM, 75% Vf.....	84
Tabla 66. Porcentaje de material PVC rígido acumulado & Dm - 0.3 mm, 75% RPM, 100% Vf.....	84
Tabla 67. Porcentaje de material PVC rígido acumulado & Dm - 0.3 mm, 75% RPM, 75% Vf.....	84
Tabla 68. Porcentaje de material PVC rígido acumulado & Dm - 0.3 mm, 50% RPM, 100% Vf.....	85
Tabla 69. Porcentaje de material PVC rígido acumulado & Dm - 0.3 mm, 50% RPM, 75% Vf.....	85
Tabla 70. Valores de índice de fluidez - HDPE	86
Tabla 71. Valores de índice de fluidez - HIPS.....	87
Tabla 72. Valores de índice de fluidez - PVC rígido	88

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la gestión de residuos plásticos representa uno de los desafíos ambientales más relevante a nivel mundial. En el año 2015, las emisiones de gases de efecto invernadero causadas por los plásticos se han incrementado a 1700 millones de toneladas de CO₂, con una proyección de 6500 millones para el año 2050, lo que llegará a representar el 15% de las emisiones de carbono a nivel global (Yang et al.,2024). En el año 2023, el Ministerio del Ambiente del Perú demostró a través de datos estadísticos que el Perú produce aproximadamente 1.2 millones de toneladas de residuos plásticos al año; sin embargo, solo el 10 % de los residuos producidos son reciclados debidamente. Ante esta situación, se ha presentado la motivación de hallar soluciones innovadoras y sostenibles para el reciclaje de los residuos plásticos (MINAM, 2024).

La presente investigación se justifica por la necesidad de reducir la acumulación y degradación de termoplásticos en vertederos mediante la aplicación de procedimientos que permitan su reciclaje. Esta estrategia contribuye al cierre del ciclo de vida de los materiales, ya que aprovecha sus propiedades mecánicas para la fabricación de materiales compuestos empleando el procedimiento de moldeo rotacional. En este contexto, se consideraron tres materiales termoplásticos que tienen una alta presencia en el mercado y presentan desafíos en términos de reciclabilidad. El polietileno de alta densidad, comúnmente utilizado en empaques, agricultura y construcción, alcanza una tasa de reciclaje cercana al 28 %, lo que lo convierte en una opción viable para su aprovechamiento mediante pulverizado (Global Growth Insights, 2024). El cloruro de polivinilo rígido, empleado principalmente en la industria de la construcción con un 70 % de participación en su demanda, muestra una tasa de reciclaje baja, estimada en aproximadamente 3%, aunque su menor cantidad de aditivos frente a su versión flexible mejora sus condiciones para el reaprovechamiento (Front Materials, 2024). Por último, el poliestireno de alto impacto alcanzó una producción global de 3.2 millones de toneladas métricas en 2024. Aunque su reciclabilidad puede verse limitada por la presencia de impurezas, su transformación mediante pulverizado permite reincorporarlo en nuevas aplicaciones productivas, lo que refuerza los principios de la economía circular (Market Growth Reports, 2024; GonPlastics, 2024). Asimismo, se han desarrollado trabajos de investigación por parte de los integrantes del Grupo

de Investigación de Ingeniería de Polímeros y Materiales Compuestos de la Pontificia Universidad Católica del Perú, que aportan significativamente en el avance de esta línea de investigación. En la tesis “Estudio del sinterizado de materiales compuestos de polietileno reciclado y madera capirona recuperada fabricados mediante moldeo rotacional”, elaborada por el MSc. Adan Smith Arribasplata Seguin en la cual propone como objetivo analizar el sinterizado de materiales compuestos de polietileno reciclado y madera recuperada, con la finalidad de promover el uso de materiales alternativos provenientes de desechos. Además, se identificaron parámetros críticos como temperatura, tiempo de calentamiento, tamaño y proporción de partículas de madera. Los resultados indicaron que, a mayor contenido de madera, el sinterizado se dificulta y produce una reducción de las propiedades mecánicas, mientras que partículas más pequeñas mejoran dichas propiedades.

Finalmente, cabe destacar que este trabajo forma parte del proyecto investigación: “Desarrollo de materiales compuestos de plástico reciclado y madera recuperada fabricados mediante moldeo rotacional de capas múltiples”, que viene realizando en la Pontificia Universidad Católica del Perú, gracias al financiamiento de PROCENCIA - CONCYTEC.

El **objetivo general** del presente trabajo es estudiar el pulverizado de termoplásticos reciclados que serán empleados como materiales alternativos para la fabricación de materiales compuestos de termoplásticos reciclados o recuperados mediante moldeo rotacional.

Complementariamente, para llevar a cabo el objetivo general, se han establecido **objetivos específicos**:

1. Elaborar un diseño experimental para el estudio del proceso del pulverizado de termoplásticos reciclados que involucre los distintos parámetros que influyen sobre dicho proceso.
2. Realizar pruebas de pulverizado de los termoplásticos reciclados y recuperados, seleccionados para el estudio según el diseño experimental.
3. Caracterizar los polvos obtenidos mediante ensayos normalizados.
4. Validar la calidad de los polvos obtenidos en la fabricación de materiales compuestos de plástico reciclado o recuperado mediante moldeo rotacional.

La **hipótesis** planteada consiste en que el pulverizado de termoplásticos reciclados o recuperados permite fabricar productos de materiales compuestos de plástico mediante moldeo rotacional. Además, la validación de la calidad de estas partículas plásticas se analizará a través de

ensayos de caracterización: FTIR, granulometría, SEM, índice de fluidez y densidad aparente

El desarrollo de este estudio está organizado en una estructura que será expuesta a continuación: El **Capítulo 1**, se centra en revisar el estado de la tecnología relacionado con la investigación. Se presentan los antecedentes relevantes, proporcionando un contexto técnico del pulverizado de termoplásticos reciclados y del moldeo rotacional. Se incluye un marco teórico en el cual se definen en detalle los procesos de pulverizado y moldeo rotacional, describiendo sus principios, tecnologías y aplicaciones actuales. En el **Capítulo 2**, se describe detalladamente la metodología empleada en la investigación. Se especifican los materiales seleccionados para el proceso de pulverizado, detallando sus características y origen. También se describen los equipos utilizados tanto para el pulverizado como para el moldeo rotacional, incluyendo sus especificaciones técnicas y condiciones de operación. Se explican las técnicas de caracterización de los polvos obtenidos, como el cálculo de la densidad aparente y el uso de microscopía para observar la morfología de las partículas. Además, se detalla el método para medir el índice de fluidez, lo cual es crucial para determinar la viabilidad de los termoplásticos pulverizados en aplicaciones de moldeo rotacional. Esta descripción metodológica asegura la reproducibilidad y rigor científico del estudio. En el **Capítulo 3**, se presentan los resultados obtenidos a lo largo de la investigación. Se exponen los datos obtenidos de las pruebas de pulverizado de los termoplásticos reciclados, así como los resultados de la caracterización de los polvos, incluyendo la densidad aparente, morfología de las partículas e índice de fluidez. Se analizan estos resultados en el contexto de los objetivos específicos planteados y se evalúa su conformidad con las hipótesis establecidas. Además, se discuten las implicaciones de los resultados en términos de la viabilidad de los polvos obtenidos para su uso en la fabricación de materiales compuestos mediante moldeo rotacional. Se incluyen gráficos, tablas y otros recursos visuales para facilitar la comprensión y discusión de resultados. En la sección de **Conclusiones** del presente trabajo de investigación, se exponen las conclusiones derivadas de los resultados obtenidos de la presente investigación. Se evalúa el cumplimiento de los objetivos generales y específicos, así como la validación o refutación de las hipótesis planteadas.

CAPÍTULO I

ESTADO DE LA TECNOLOGÍA

1.1. ANTECEDENTES

El presente trabajo de investigación se basa en las técnicas y procedimientos desarrollados en el campo de ciencia de los materiales a lo largo de los años con respecto a los objetivos planteados. A continuación, se detalla la literatura empleada:

En la investigación de Julia Marie McDaid (1998) se plantea como objetivos analizar el proceso de pulverizado en su totalidad, identificar los factores clave que influyen en la eficiencia del proceso y relacionar las características del polvo con la calidad de las piezas moldeadas. Para desarrollar la investigación se llevaron a cabo ensayos de molienda y de moldeo, identificando la temperatura de procesamiento, la temperatura de enfriamiento y la temperatura post calentamiento. En los ensayos de moldeo rotacional se moldearon piezas con los polvos obtenidos del pulverizado del polietileno. Los resultados evidenciaron que la calidad de los polvos mejoraba al ser recocidos a altas temperaturas de procesamiento o durante un tiempo prolongado a una velocidad de enfriamiento lenta. Paralelamente, resalta la influencia de las características de la zona de molienda, como la longitud, el ángulo de la placa rotativa, el número y el ángulo de los dientes rotativos, en la eficiencia del rendimiento del proceso. Finalizado el proceso de moldeo se estableció que la calidad del polvo es crítica para reducir la porosidad superficial en los productos moldeados, pero tiene efecto limitado sobre las propiedades físicas.

Por su parte, Antonio Greco y Alfonso Maffezzoli (2004) enfocan su estudio en analizar el proceso de pulverizado del polietileno de alta densidad reciclado bajo un enfoque cuantitativo orientado a la forma y al tamaño de los polvos. Adicionalmente, se estudió la influencia de la forma y el tamaño de los polvos en el comportamiento de sinterización mediante análisis termomecánico. La metodología consistió en pulverizar el material de estudio mediante un molino ultracentrífugo ZM100 de Retsch en tres rangos de temperatura de molienda: $T \leq 40^{\circ}\text{C}$ (tipo L); $60^{\circ}\text{C} \leq T \leq 70^{\circ}\text{C}$ (Tipo M); $90^{\circ}\text{C} \leq T \leq 110^{\circ}\text{C}$ (Tipo H). Además, se realizó un tamizado adicional en los polvos de tipo H después del pulverizado debido a los fenómenos de coalescencia de polvo en el lado externo del tamiz durante el proceso. Los resultados

evidenciaron que el tamaño y la forma influye en las propiedades a granel de los polvos y en su comportamiento de sinterización. A partir del modelo matemático introducido, validado con observaciones experimentales de TMA, mostraron que se puede seleccionar una temperatura de molienda óptima.

Complementariamente, Jochen Schmidt et al. (2012), propusieron un enfoque alternativo al evaluar la pulverización en húmedo de polímeros mediante molinos de medios agitadores y solventes orgánicos (etanol, hexano) a temperaturas reducidas (hasta $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$), con el objetivo de obtener partículas poliméricas con un diámetro medio menor de $5\text{ }\mu\text{m}$ y una distribución estrecha del tamaño de partículas. Para ello, se realizaron experimentos de molienda en húmedo utilizando un molino de medios agitador de laboratorio con una fracción de masa de aproximadamente 6.5 a 7% de material de molienda, variando la intensidad de estrés y la velocidad del agitador. Se utilizaron perlas de molienda de ZrO_2 estabilizadas con itria de diferentes tamaños, manteniendo la temperatura en rangos controlados. Las distribuciones de tamaño de partículas se obtuvieron mediante difracción láser, y los materiales de alimentación poliméricos se caracterizaron mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC). Los resultados indicaron que la molienda en húmedo de partículas de polímero en etanol y hexano a temperaturas moderadamente reducidas permite producir partículas de poliestireno (PS) y polieteretercetona (PEEK) en molinos de medios agitadores. A diferencia de los molinos de impacto o de corte, se pueden obtener partículas de producto más pequeñas, por debajo de $5\text{ }\mu\text{m}$, sin necesidad de utilizar temperaturas de nitrógeno líquido. La molienda en húmedo presenta una ventaja en comparación con la molienda por impacto debido al mayor número de estrés en los molinos de medios agitadores. Por ejemplo, se obtuvieron partículas de poliestireno de $1.9\text{ }\mu\text{m}$ a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, comparadas con $3.3\text{ }\mu\text{m}$ a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ en tiempos de proceso y energías de estrés similares. En el caso del material de alimentación de PEEK, se obtuvieron tamaños de partículas de $7.3\text{ }\mu\text{m}$ a $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $5.4\text{ }\mu\text{m}$ a $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ en un sistema de etanol. Con hexano como solvente a $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$, se lograron partículas de $2.8\text{ }\mu\text{m}$. Este enfoque es aplicable incluso a materiales con alta tenacidad a la fractura y grandes elongaciones de ruptura como el PEEK semicristalino.

Finalmente, el trabajo desarrollado por Josef Flizikowski et al. (2019), se centró en optimizar la uniformidad del proceso de molienda de polímeros termoplásticos reciclados y en reducir el consumo de energía del proceso de molienda para el reciclaje de polímeros. Razón por la cual, se abordó un análisis que contempló aspectos técnicos, materiales y de control. La

metodología empleada consistió en usar una dependencia general para un análisis detallado de la uniformidad, abarcando la esencia del procesamiento de máquinas para materiales heterogéneos (materiales termoplásticos de polímeros provenientes de desechos). Se consideraron las variables de resistencia individual al pulverizado, características operacionales del motor y la caja de cambios de la trituradora, constante de tiempo del sistema de control del accionamiento, pulverizado y servicio, y características de rendimiento de los dispositivos operativos (selectores, alimentadores, separadores, entre otros). Se estableció la relación y correlación entre la irregularidad general del pulverizado (δR) y varios factores como la operación irregular de la máquina de pulverizado (δMR), del sistema de accionamiento (δN), del sistema de control (δS), de los dispositivos de servicio y suministro (δO), y de las propiedades del material alimentado (δM), además del tiempo de observación (t). En condiciones de una alimentación prolongada, se utilizó una tolva de alimentación fijada a la estructura o placa de fundación para alimentar materiales poliméricos en cuasi-cizallamiento. Un agujero de disco se usó para cortar los materiales poliméricos en piezas mediante la acción de los bordes, y el producto de molienda se expulsó con cuchillas. La relación geométrica del alimentador y el cálculo de ángulos y posiciones se realizaron para reducir la resistencia al corte y el movimiento del material, disminuyendo así la irregularidad en el suministro de energía. Se concluyó que la uniformidad de la molienda de materiales poliméricos aumenta cuando la relación S/D es 0.25 o 1.67; sin embargo, la uniformidad de la molienda para una relación S/D de 1.67 es mejor que para una relación S/D de 0.25.

1.2. MATERIALES POLIMÉRICOS

En la naturaleza se han podido ubicar polímeros de fuentes naturales como las proteínas, almidón, entre otros (REJIGLASS, 2022); sin embargo, conforme se ha ido desarrollando las industrias a lo largo de la historia, los polímeros sintéticos han ido ocupando terreno debido a la versatilidad de sus propiedades y su sencillo procesamiento. Dentro de las características que ofrecen los plásticos, se pueden resaltar su baja densidad comparado con materiales metálicos, su poca fragilidad y su facilidad en el uso para moldeo de piezas (Hermida, 2011).

Los polímeros son considerados como moléculas de gran tamaño, que está conformadas por cadenas orgánicas denominadas monómeros, las cuales

se encuentran unidas a través de enlaces covalentes. Estos son producidos a través de un proceso llamado polimerización formando enormes cadenas de macromoléculas (Hermida, 2011). Estos se pueden clasificar en 3 tipos de polímeros (Figura 1): termoplásticos, termoestables y elastómeros (Torres, 1999).

1.2.1. Termoplásticos:

Son aquellos polímeros que pueden experimentar numerosos ciclos de calentamiento y enfriamiento, lo que posibilita su reprocesamiento y reciclaje. Al disminuir su temperatura por debajo de la transición vítrea, los termoplásticos adquieren un comportamiento frágil. Los termoplásticos presentan una estructura molecular sencilla, compuesta por macromoléculas que son químicamente independientes entre sí (SINTAC, 2022). Las aplicaciones de los termoplásticos son amplias, y se pueden encontrar en diversas industrias (Klumex, 2023):

- Automotriz: los termoplásticos se usan en partes como faros, paneles internos y sistemas de tuberías.
- Electrónica: estos polímeros son ideales para carcasas de teléfonos, conectores e interruptores debido a su capacidad aislante.
- Construcción: se emplean en tuberías, aislamientos térmicos y revestimientos, destacando el PVC y el polietileno reticulado (PEX).
- Para calzado y ropa, se usan en suelas de calzado y como nylon en la industria textil, proporcionando resistencia al desgaste y flexibilidad.

1.2.2. Termoestables:

Los termoestables, también conocidos como polímeros entrecruzados, presentan una reciclabilidad limitada debido a su estructura reticulada irreversible (Varón, Balart, Ferrándiz, & García, 2012). Estos polímeros adquieren una forma permanente después de haber sido moldeados a elevadas temperaturas ya que, no pueden volver a ser fundidos por la razón de que se queman evitando que puedan volver a ser moldeados. Las ventajas que ofrecen los polímeros termoestables están relacionadas con la durabilidad, dureza y bajo peso (PLAREMESA, s.f.).

1.2.3. Elastómeros:

Los elastómeros son aquellos polímeros que están constituidos por cadenas poliméricas largas. Este tipo de estructura hace posible que el material presente gran deformación elástica a condiciones de temperatura ambiente.

Los elastómeros se pueden clasificar en: termoestables y termoplásticos. Los elastómeros termoestables son aquellos que se curan con el objetivo de alcanzar un estado de reticulación entre las cadenas polímero. Este estado es irreversible a diferencia de los elastómeros termoplásticos. Los elastómeros termoplásticos, comparten una gran cantidad de propiedades físicas de los termoestables, y son empleados como adhesivos, calzado, sistemas de curado, entre otras aplicaciones (Meseguer, Portoles, & Martínez, 2020).

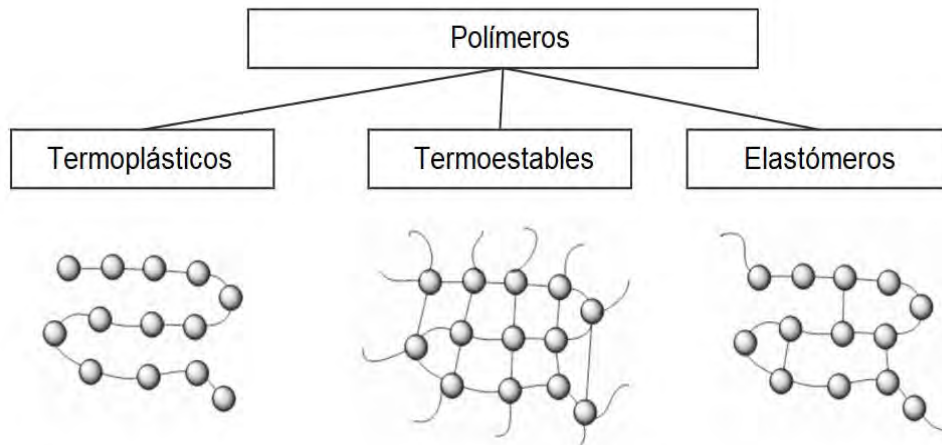


Figura 1. Clasificación de los polímeros y su estructura esquemática (Aldousiri et al, 2013; Vashchuk et al., 2018)

1.3. RECUPERACIÓN Y RECICLAJE DE MATERIALES TERMOPLÁSTICOS

En base a la norma ISO 15270:2008 – Plásticos. Directrices para la recuperación y reciclado de residuos plásticos, se establece que el material recuperado corresponde a residuos plásticos que han sido separados y acondicionados para su aprovechamiento, sin necesidad de una transformación estructural. En esta investigación se trabajó con materiales recuperados y reciclados, ambos considerados insumos clave dentro del enfoque de valorización de residuos termoplásticos.

La distinción entre estos tipos de materiales resulta fundamental para comprender su origen y el estado en que ingresan al estudio, lo que condiciona las etapas posteriores de análisis. En este contexto, la misma norma define el reciclaje como el procesamiento de residuos plásticos para el propósito original o para otros fines, excluyendo la recuperación energética, lo que permite enmarcar técnicamente el proceso que se abordará en el estudio. Este enfoque no solo establece los límites operativos del reciclaje, sino que también lo posiciona como una estrategia eficaz para modificar el ciclo de vida de los productos fabricados (Figura 2), al reducir la necesidad de extracción y procesamiento de materias primas vírgenes, contribuyendo así a una gestión

más sostenible de los residuos plásticos (Vásquez, Espinosa, Beltrán & Velasco, 2014).

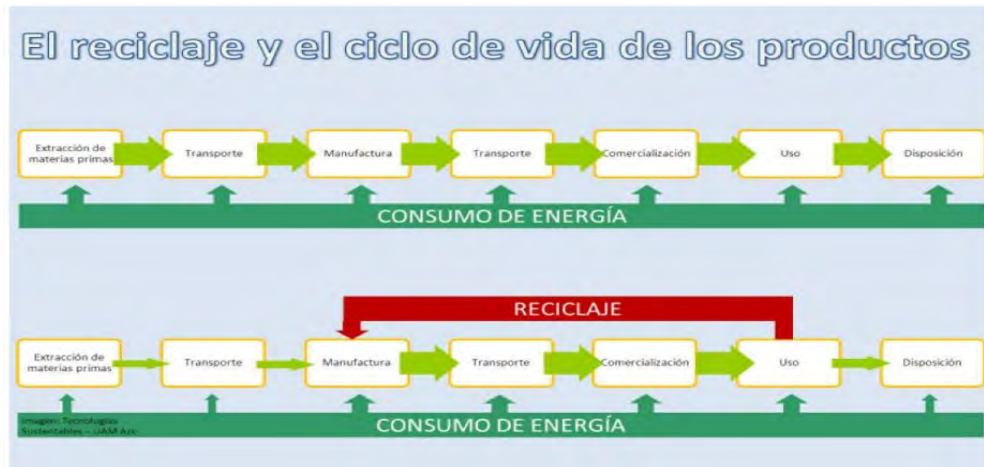


Figura 2. Proceso de reciclado (Vásquez, Espinosa, Beltrán, & Velasco, 2014)

1.3.1. Tipos de reciclado

a. Químico:

El reciclado químico (Figura 3) comprende una variedad de tecnologías que permite descomponer plásticos y otros polímeros derivados de distintos flujos de residuos en elementos básicos (Despolimerización). Estos elementos, como monómeros y oligómeros, se transforman en materias primas secundarias de gran valor, empleadas como base para la producción de nuevos productos químicos y polímeros sostenibles a través de craqueo, gasificación o despolimerización según la norma ISO 15270:2008.



Figura 3. Reciclado químico: Polimerización y despolimerización (AIMPLAS, 2022)

b. Energético:

El reciclado energético del plástico es una alternativa al reciclado mecánico y químico, debido a su elevado poder calorífico. Los plásticos que son

derivados del petróleo y el gas natural, actúan como combustibles eficaces y, al combinarse con otros residuos, facilitan la combustión de desechos orgánicos. En la Figura 4 se puede observar el esquema del proceso que involucra alcanzar temperaturas específicas y garantizar un tiempo de resistencia adecuado, maximizando la energía liberada y eliminando los componentes nocivos generados (Ecoplas, 2017).



Figura 4. Esquema del reciclado energético del plástico (Ecoplas, 2017)

c. Mecánico:

El reciclaje mecánico de los plásticos, consisten en la transformación de residuos plásticos en materia prima utilizable a través de un proceso de varias etapas (Figura 5). Primero, los plásticos son clasificados según su tipo y color, lo que garantiza una composición homogénea. Seguidamente, se trituran en pequeños fragmentos, que son lavados para eliminar residuos e impurezas. Posteriormente, estos fragmentos se secan para eliminar la humedad restante y finalmente, son convertidos en pellets mediante extrusión, un proceso que da forma a los plásticos para su reutilización (Barrios, 2024).



Figura 5. Esquema del reciclado mecánico de plásticos (Castaño, 2024)

1.3.2. Proceso de reciclado

Para llevar a cabo el proceso de reciclado que consta de 5 etapas fundamentales que transforman los residuos en nuevos recursos útiles. La exploración de dichas etapas será abordada a continuación (Ecoplas, 2011).

a. Segregación:

En la presente etapa se ejecuta la clasificación de productos según el tipo de plástico y su color. Este proceso se puede llevar a cabo de manera manual o empleando tecnologías de clasificación automática. La importancia de esta etapa radica que, con una adecuada segregación o clasificación, se obtendrá un producto final de alta calidad.

b. Triturado:

En la etapa de molienda o triturado se efectúa el picado de los plásticos, con la finalidad de obtener un producto más homogéneo que permita liberarlo de agentes contaminantes, y un lavado más óptimo.

c. Lavado:

En la etapa de lavado se realiza la limpieza de los productos en caso se identifiquen contaminantes, a través de agua y detergentes de baja espuma.

d. Secado:

En la etapa de secado se procede a retirar la humedad absorbida por el producto en la etapa de lavado.

e. Embolsado:

En esta etapa final, se recolectan los pellets que han sido producidos a través de las etapas anteriores.

f. Procesos alternativos

• Moldeo por Extrusión:

El objetivo de la etapa de extrusión, es homogenizar el tamaño de las partículas del material plástico, el cual es introducido en el tornillo de un extrusor, donde se funde mediante la acción del calor, para ser empujado a través de una matriz. Seguidamente, se enfría con agua y se corta en pequeños cilindros de aproximadamente 3 mm x 3mm, denominados "pellets".

• Moldeo Rotacional:

Este proceso permite producir piezas huecas a partir de la transformación de polvos a través del calentamiento de un molde en un horno. El calor proveniente del horno permite la fusión del plástico dentro del molde, el cual debe para asegurar una distribución uniforme del material fundido sobre toda su superficie interna (Vilcayauri, 2020).

- **Moldeo por Compresión:**

Es un método de conformado en el que el material plástico se calienta hasta ablandarse, permitiendo adoptar la geometría requerida del molde (Dassault Systèmes, 2022).

- **Moldeo por Inyección:**

El moldeo por inyección es uno de los métodos más significativos en la manufactura de plásticos. Este proceso consiste en la fundición de un polímero que será inyectado a presión en el interior de un molde a una alta temperatura, el cual permitirá obtener productos después de un período de enfriamiento (Buitrago, 2023).

1.4. PROCESO DE PULVERIZADO

La fabricación de productos plásticos de carácter industrial: envasado, automoción, manufacturera, medicina, aeronáutica, deportes, etc (Palamatic Process, 2024), se realizan a través de polvos plásticos (Figura 6.B) los cuales son obtenidos a través del proceso de pulverizado de plásticos realizado por una máquina pulverizadora (Figura 6.A). El proceso estándar consiste en introducir el material de alimentación en forma de gránulos en la tolva de alimentación de la pulverizadora mediante un sistema de alimentación vibratorio. Un sistema de aspiración especialmente diseñado para esta aplicación se encarga de extraer el material molido. El material de grano grueso que permanece en el filtro se vuelve a introducir en el molino a través de un sistema de circuito cerrado. El producto terminado se pesa en bolsas, se coloca en contenedores o se transporta a los procesos y sistemas del silo, según las necesidades (PALLMANN, 2018).

Las ventajas que ofrecen el proceso de pulverizado de plásticos permiten reducir el volumen de los desechos plásticos de manera eficiente, lo que facilita su almacenamiento, transporte y procesamiento. Con el fin de analizar la calidad de los polvos plásticos obtenidos, estos frecuentemente son sometidos a los siguientes ensayos normalizados: granulometría, tiempo de fluidez y densidad aparente (PALLMANN, 2018).

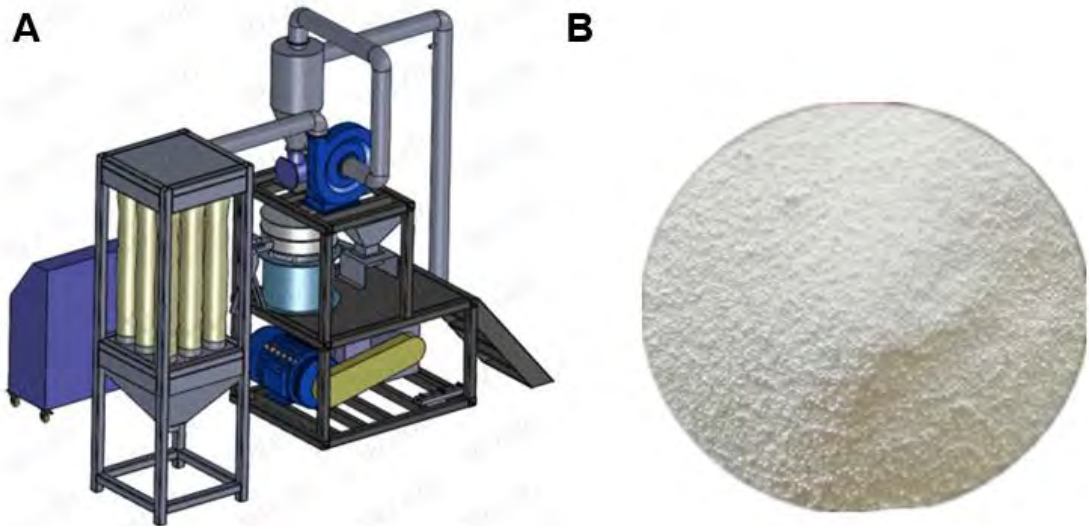


Figura 6. A. Máquina Pulverizadora (WEDO MACHINERY, s.f) B. Polvos plásticos pulverizados

1.4.1. Parámetros del proceso

Los parámetros involucrados en el proceso de pulverizado, presentan una gran influencia para obtener polvos de calidad óptima. Los parámetros son los siguientes:

a. Temperatura de procesamiento:

El parámetro de temperatura afecta la calidad del polvo producido como la estabilidad del proceso. Este parámetro debe mantenerse dentro de un rango óptimo, basado en la naturaleza del material procesado. El control se logra a través de controles que regulan el flujo de aire, velocidad de alimentación y RPM del motor. Además, la temperatura ambiente juega un papel importante ya que, a temperaturas altas, el aire que ingresa al molino tiene menor capacidad de enfriamiento y a temperaturas bajas, es difícil alcanzar el rango óptimo de procesamiento (McDaid, 1998).

b. Tasa de alimentación:

La tasa de alimentación es un parámetro crucial que debe ser ajustado cuidadosamente para mantener la estabilidad del sistema. Un aumento rápido en la velocidad de alimentación puede sobrecargar el motor de la pulverizadora, afectando la calidad de los polvos obtenidos (McDaid, 1998).

c. Separación entre discos de corte:

La separación entre discos de corte es un parámetro crítico que determina el tamaño final de las partículas. Un ajuste más estrecho puede generar partículas de tamaño más fino; sin embargo, pueden provocar sobrecalentamiento, lo que puede resultar perjudicial en materiales sensibles a los altos niveles de temperatura. Por otro lado, una mayor separación

puede incrementar el tamaño de las partículas, lo cual podría no ser adecuado para determinar aplicaciones (McDaid, 1998).

d. Velocidad del motor:

Esta variable se regula en revoluciones por minuto (RPM), e influye en la eficiencia del pulverizado. Velocidades más elevadas producen mayor energía de impacto, facilitando la reducción del tamaño de partículas, incrementando la generación de calor (McDaid, 1998).

1.4.2. Caracterización de polvos

Para garantizar la calidad de los polvos producidos, es necesario realizar una caracterización exhaustiva a través de ensayos normalizados. Entre las técnicas de caracterización más importantes se encuentran la densidad aparente, la granulometría, la microscopía y el índice de fluidez.

a. Densidad aparente

La densidad aparente es una medida clave que relaciona la masa y el volumen ocupado por partículas de polvo. Además, permite determinar la compactación de los polvos y con ello saber si cuentan con una alta o baja porosidad. Es decir, si los polvos cuentan con una baja densidad aparente, estos tienen un alto porcentaje de porosidad; y si cuentan con una alta densidad aparente, estos polvos tienen un bajo porcentaje de porosidad (Li & Ren, 2011).

b. Granulometría

El ensayo de granulometría permite evaluar la distribución del tamaño de las partículas obtenidas del proceso de pulverizado. El tamaño de las partículas influye en las propiedades físicas y químicas de los materiales, lo cual cataloga como un indicador valioso de calidad y rendimiento (Ilangovan, Subha, Earnest, Kirubanandan, & Renganathan, 2021).

c. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

El SEM, proporciona información visual sobre la forma, textura superficial y morfología de las partículas. Estas características son importantes ya que, influyen en la cohesión entre partículas y la interacción del polvo con otros materiales. Además, pueden proporcionar características de estructuras a nivel molecular, nano y micro (Mattsson, Hugo da Silva, Deonarine, Louie, & Gondikas, 2021).

d. Índice de fluidez

El índice de fluidez, es una prueba empleada para medir la viscosidad de un polímero termoplástico. Esta medida se define como el peso del polímero que fluye a través de una boquilla durante 10 minutos, bajo una presión y

temperatura determinada. El método se proporciona en ASTM D1238 e ISO 1133 (Mckeen, 2012).

e. **Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)**

La espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) es una técnica vibracional que permite analizar materiales mediante la medición de la radiación infrarroja que estos absorben, transmiten o reflejan. Cada molécula presenta un patrón único de absorción asociado a su estructura química específica (Massonnet & Muehlethaler, 2021).

1.5. PROCESO DE MOLDEO ROTACIONAL

El proceso de moldeo rotacional catalogada como una técnica emergente en el procesamiento de plástico, (Gupta, 2020) permite la producción de objetos con formas complejas y/o de gran volumen a costos relativamente bajos comparado con otros procesos complejos (Barczewski et al., 2021) y presentan un bajo nivel de tensión residual (Arribasplata et al., 2021).

El proceso consiste en utilizar una técnica de movimiento y cubrimiento para transformar materiales poliméricos termoplásticos, generalmente en forma de polvo o líquido, en una variedad de artículos huecos. Este método emplea una rotación biaxial, donde dos brazos perpendiculares giran sobre sus ejes, y el plástico se adhiere a las paredes internas del molde dentro de un horno, formando una masa continua y uniforme (Ortiz, 2003). Con un molde cerrado de paredes delgadas y alta capacidad de transferencia de calor, el proceso se divide en cuatro etapas simples, sin necesidad de aplicar altas presiones. Esto permite obtener piezas con tensiones mínimas internas, mayor resistencia mecánica y libertad de diseño, incluyendo geometrías complejas y superficies texturizadas. Además, los artículos resultantes no presentan costuras o marcas de expulsión y pueden variar en tamaño, desde pequeños bulbos hasta grandes tanques de almacenamiento (Schott, 2011).

El proceso de moldeo rotacional para ser desarrollado consta de la realización de 4 pasos, que serán descritos a continuación (Ortiz, 2003):

1.5.1. Secuencia operativa del moldeo rotacional

El moldeo rotacional es un proceso que se desarrolla en cuatro etapas principales. En primer lugar, se realiza la carga o llenado del molde, colocando en su interior el material en forma de polvo o granza, cuya cantidad corresponde al peso del producto final deseado. El molde, previamente recubierto con un agente desmoldante, se cierra herméticamente y se introduce en un horno. A continuación, durante la etapa de horneado, el molde es sometido a temperaturas elevadas, típicamente entre 260 °C y 400 °C, mientras gira simultáneamente

sobre dos ejes perpendiculares. Este movimiento permite que el material fundido se distribuya uniformemente y se adhiera a las paredes internas del molde, formando una capa continua. Seguidamente, se lleva a cabo la etapa de enfriamiento, en la cual el molde aún en rotación es sometido a una corriente de aire frío, agua pulverizada o una combinación de ambos, lo que permite que el material solidifique conservando la forma deseada. Finalmente, cuando la pieza ha alcanzado la rigidez suficiente, se procede a su descarga o vaciado, retirándola cuidadosamente del molde para dar paso a un nuevo ciclo productivo (Ortiz, 2003).

1.5.2. Moldeo rotacional de materiales compuestos de plástico y madera

Un estudio realizado por Arribasplata-Seguin et al. (2021) evaluó la viabilidad de fabricar materiales compuestos a partir de polietileno reciclado de alta densidad (HDPER) y partículas de madera (Figura 7.B), mediante el proceso de moldeo rotacional (Figura 7.A). El HDPER empleado provenía del reciclaje de tapas plásticas, mientras que las partículas de madera utilizadas eran de capirona y pino, seleccionadas por su baja densidad y propiedades sostenibles. El análisis experimental consideró parámetros como el tiempo de calentamiento (entre 19 y 28 minutos), la temperatura del horno (280 °C a 350 °C), así como el tamaño (297 μm a 2000 μm) y porcentaje de contenido de madera (0 % a 30 %) en la mezcla. Los ensayos mecánicos de tracción revelaron que un mayor contenido de madera tiende a disminuir la resistencia del material compuesto, debido a la interferencia en el proceso de sinterización y a la formación de zonas no fundidas. Sin embargo, también se observó una mejora en la rigidez y el acabado estético del producto en mezclas con proporciones moderadas de madera. Mediante análisis de microscopía, se confirmó que una sinterización adecuada genera superficies más homogéneas y sin discontinuidades aparentes. El estudio concluyó que la mezcla óptima fue 15 % de partículas de madera y 85 % de HDPER, procesada a 320 °C durante 25 minutos, lo que permitió obtener piezas con propiedades mecánicas estables y potencial para aplicaciones industriales, demostrando así la viabilidad de este tipo de materiales compuestos en procesos de moldeo rotacional.

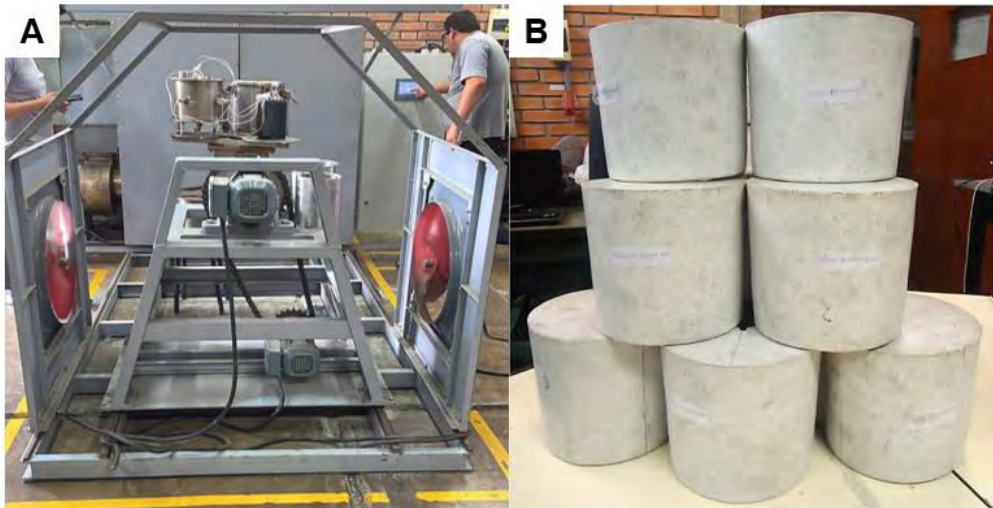


Figura 7.A. Proceso de moldeo rotacional (Fuente: Laboratorio de Investigación N°4) B. Muestras cilíndricas de material compuesto de plástico y madera (Arribasplata-Seguin et al., 2021)



CAPÍTULO II

METODOLOGÍA

2.1. MATERIALES

2.1.1. HDPE (Polietileno de alta densidad)

El HDPE utilizado en esta investigación fue obtenido a partir de tapas plásticas de botellas recolectadas manualmente (Figura 8). Este polímero está conformado por unidades repetitivas del monómero etileno ($-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$) y presenta una estructura semicristalina, caracterizada por cadenas lineales con escasa ramificación. Esta conformación le otorga alta densidad, buena resistencia mecánica, estabilidad térmica y química. Su temperatura de transición vítrea (T_g) se sitúa alrededor de $-100\text{ }^\circ\text{C}$ (Greene, 2021), lo que explica su comportamiento flexible y tenaz a temperatura ambiente.

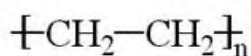


Figura 8. Tapas recicladas de HDPE (Recycled Polymers, 2020)

2.1.2. HIPS (Poliestireno de alto impacto)

El poliestireno de alto impacto (HIPS) utilizado en esta investigación fue recibido sin triturar, y corresponde a residuos industriales provenientes de la fabricación de vasos de yogur (Figura 9). Este material está formado por una matriz de poliestireno modificada con una fase elastomérica de butadieno en proporciones típicas de entre 5 % y 14 %, lo que mejora considerablemente su resistencia al impacto en comparación con el poliestireno convencional. Además, presenta buena estabilidad frente a sustancias como aceites minerales, grasas sólidas y líquidos orgánicos, lo que favorece su uso en aplicaciones de moldeo por inyección dentro de sectores como el embalaje, la electrónica y los bienes de consumo. Su temperatura de transición vítrea se encuentra en torno a $90\text{ }^\circ\text{C}$, lo que le permite

mantener rigidez estructural a temperatura ambiente y modificar su comportamiento mecánico en condiciones térmicas elevadas (Yilmaz, Sahin, & Sinmazcelik, 2009).



Figura 9. Envase de yogurt a base de polystyrol (Bioplásticos, 2014)

2.1.3. PVC rígido (Policloruro de vinilo)

El PVC empleado en esta investigación fue recibido en forma de láminas planas (Figura 10) y está constituido por unidades repetitivas de cloruro de vinilo ($-CH_2-CHCl-$), cuya estructura lineal y polar le confiere rigidez, además de permitirle soportar altos niveles de esfuerzo mecánico durante procesos de reciclado sin comprometer sus propiedades físicas más relevantes (Barbas,2023), lo que facilita su recuperación y reutilización en nuevas aplicaciones. Su temperatura de transición vítrea (T_g) se encuentra en torno a $79,41\text{ }^\circ\text{C}$, temperatura a partir de la cual el material comienza a perder rigidez cuando es sometido a sollicitaciones térmicas (Hadj Amar, Chabira, Sebaa, & Ahmed, 2019).

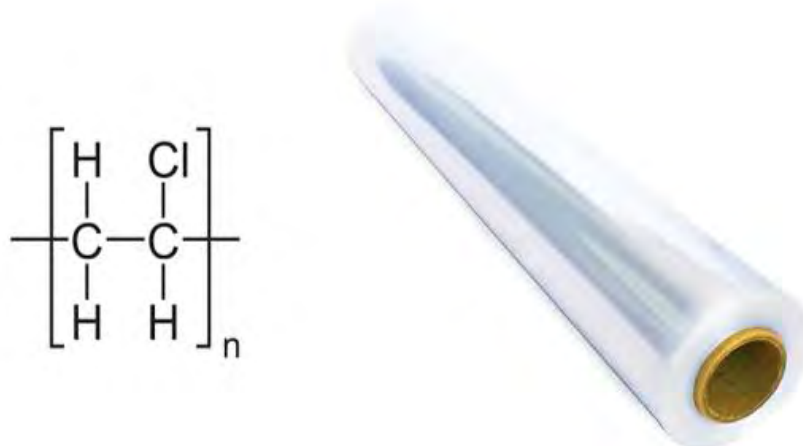


Figura 10. Rollos de láminas planas de PVC rígido (Myers, 2020)

2.2. EQUIPOS

2.2.1. Máquina Trituradora

La máquina trituradora adquirida en el presente trabajo de investigación, ha sido financiada por PROCENCIA. Este equipo de modelo PNSF – 10 (Figura 11) con 580kg y capacidad de 400-600 kg/h, posee una estructura compacta, con una tolva de alimentación con doble capa en 4 lados y una capa interior de acero inoxidable. La trituración se efectúa en la sección de cuchillas de corte fabricadas con acero para herramientas de alta resistencia, la cual le brinda alta dureza, adecuada resistencia a la abrasión y tiempos prolongados de vida útil. Este proceso es impulsado por un motor con potencia de 7.5 kW y 720 RPM, accionado desde el panel de operación, en cual figura adicionalmente un interruptor de parada de emergencia en caso de una posible falla. El material triturado es filtrado en la malla de pantalla del equipo y es recolectado en el contenedor de almacenamiento (Wanrooe Hightech, 2019).



Figura 11. Equipo de trituración de material (Fuente: Propia)

2.2.2. Máquina pulverizadora

Para desarrollar el proceso de pulverizado se utilizó el equipo pulverizador PNMF-300-High Speed Pulverizer (Tabla 1) financiado por PROCENCIA, el cual viene siendo ampliamente empleado en la industria de fabricación de productos plásticos. Además, posee ventajas como optimizar el reciclaje de desechos en el procesamiento de los productos plásticos, y operar

con un alto rendimiento produciendo de 30 a 50 kg/h a un bajo consumo de energía (Wanrooe Machinery Co., LTD, 2024).

Tabla 1 Parámetros Técnicos Principales de la Pulverizadora (Wanrooe Machinery Co., LTD, 2024)

Parámetro Técnico	Valor
Diámetro interno de molienda	300 mm
Material del disco de corte	D2
Velocidad del motor principal	3800 RPM
Potencia del motor principal	11 kW
Potencia del air locker	0.55 kW
Potencia del air blower	2.2 kW
Potencia de vibración	0.75 kW
Producción	30 – 50 kg/h
Malla	Malla 10 – 120
Peso	1200 kg
Voltaje	400V / 50Hz

Tabla 2. Parámetros de Temperatura sugeridos por el proveedor (Wanrooe Machinery Co., LTD, 2024)

Material	Temperatura adecuada de trabajo	Temperatura máxima de trabajo
PET	45°C	50°C
PP	45°C	50°C
PE	75°C	85°C
LDPE	75°C	85°C
HDPE	75°C	85°C
Soft PVC	75°C	85°C
Rigid PVC	75°C	85°C

2.3. PROCESO DE PULVERIZACIÓN

El desarrollo del proceso de pulverización (Figura 12) en la presente investigación inicia con el ingreso del material triturado en el alimentador sin fin, el cual será trasladado a los discos de corte. Los discos de corte, cuentan con una determinada cantidad de dientes y se encuentran separados por una determinada distancia, la cual tiene influencia sobre la calidad de los polvos y la temperatura de trabajo del material. En su paso por los discos de corte, el material es cizallado y reducido, para posteriormente ser conducido hacia el ciclón del pulverizador donde se produce la separación de las partículas sólidas suspendidas en el aire, para finalmente ser

tamizadas en cribas de 500 μ m. Las partículas que no llegan a poseer un tamaño menor que la luz de la malla de la criba serán recolectados y redirigidos hacia los discos de corte para ser nuevamente cizallados.

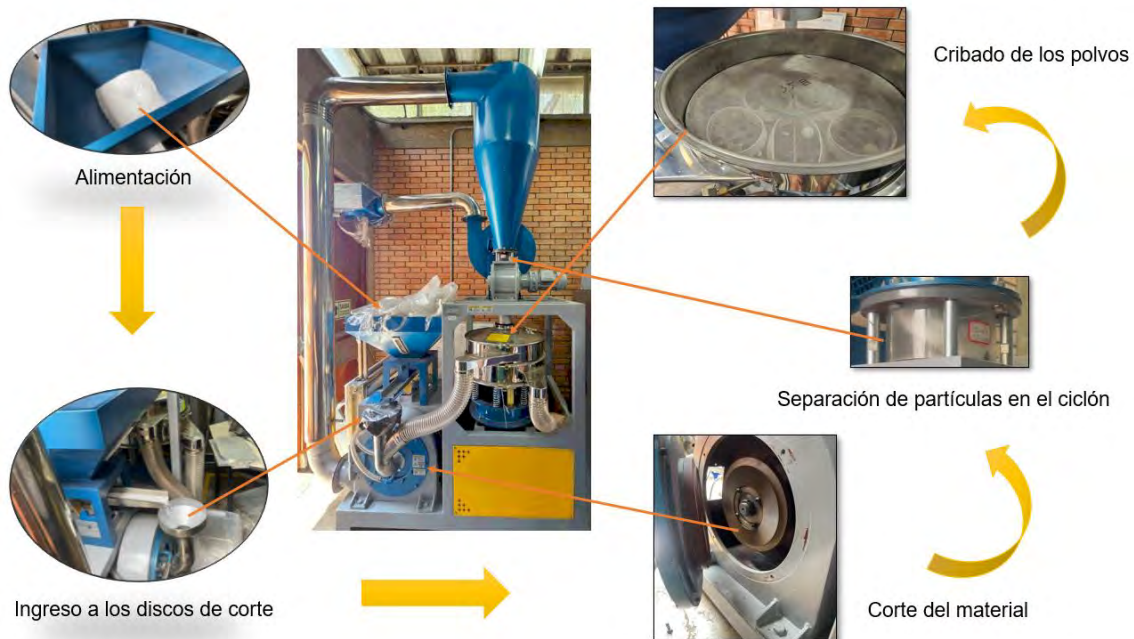


Figura 12. Procedimiento de la pulverización (Fuente: Propia)

2.4. DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño experimental se estructuró para evaluar los el efecto de los diversos parámetros operativos sobre la calidad del polvo obtenido a partir de material termoplástico reciclado. En primer lugar, se procedió con la trituración del material recuperado, debido a que este se obtuvo en formas poco manejables para el proceso de pulverización. Esta etapa previa permitió reducir el tamaño del material hasta obtener fragmentos aptos para ingresar a la tolva de alimentación de la máquina pulverizadora. Durante el proceso de pulverización, se establecieron 3 condiciones experimentales en función del espaciamiento entre discos de corte:

- Espaciamiento 1 (máximo): 1.2 mm
- Espaciamiento 2 (medio): 0.6 mm
- Espaciamiento 3 (mínimo): 0.3 mm

Cada una de estas configuraciones fue evaluada considerando 3 velocidades del motor de accionamiento de los discos de corte (50% RPM, 75% RPM y 100% RPM) y dos velocidades de alimentación (75%Vf y 100 %Vf). Esta estructura dio lugar a 18 condiciones distintas por espaciamiento, lo que en su totalidad se han obtenido 54 muestras (ver ANEXOS). Posteriormente, los polvos han sido caracterizados en el Laboratorio de Materiales – CITE Materiales, con el objetivo de seleccionar aquellos parámetros asociados a su calidad, como se detallan en la sección 2.5.

Tabla 3. Configuración de los parámetros en el pulverizado (Fuente: Propia)

Condición	e (mm)	V(RPM)	Alimentación (%)
Espaciamiento 1 (máximo)	1.2	1900	75
			100
		2850	75
			100
		3800	75
			100
Espaciamiento 2 (medio)	0.6	1900	75
			100
		2850	75
			100
		3800	75
			100
Espaciamiento 3 (mínimo)	0.3	1900	75
			100
		2850	75
			100
		3800	75
			100

2.5. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN

Finalizado el proceso de pulverización es requerido analizar los polvos plásticos obtenidos, ya que permitirá establecer las características de estos previo a ser introducidos en el rotomoldeo. La calidad de los polvos representa una gran influencia en el producto final. Los ensayos normalizados a realizar se detallan a continuación:

2.5.1. Densidad aparente

El ensayo de densidad aparente de los polvos obtenidos en el proceso de pulverizado se realizó siguiendo los lineamientos de la norma ASTM D1895 – 17, titulada Standard Test Methods for Apparent Density, Bulk Factor, and Pourability of Plastic Materials. Esta norma establece las especificaciones para la construcción y uso de un dispositivo tipo embudo (Figura 13), a través del cual se vierte el polvo plástico con el fin de evaluar su comportamiento a granel. El procedimiento consistió en verter manualmente el polvo en el embudo, mantener cerrado el orificio de descarga y luego habilitarlo para permitir que el material fluya libremente hasta llenar

por gravedad un cilindro colector ubicado en la parte inferior. Una vez lleno, se pesó el cilindro con el contenido y posteriormente se descontó el peso del cilindro vacío, obteniéndose así el peso neto del polvo. El cálculo de la densidad aparente se determina con la siguiente ecuación:

$$V = H \times A \quad (2.1)$$

$$\text{Densidad Aparente} = W/V$$

Donde:

V: volumen ocupado por el material en el cilindro de medición (cm³)

H: altura del material por el material en el cilindro de medición (cm)

A: área de la sección transversal del cilindro de medición (cm²)

W: peso del material en el cilindro (g)

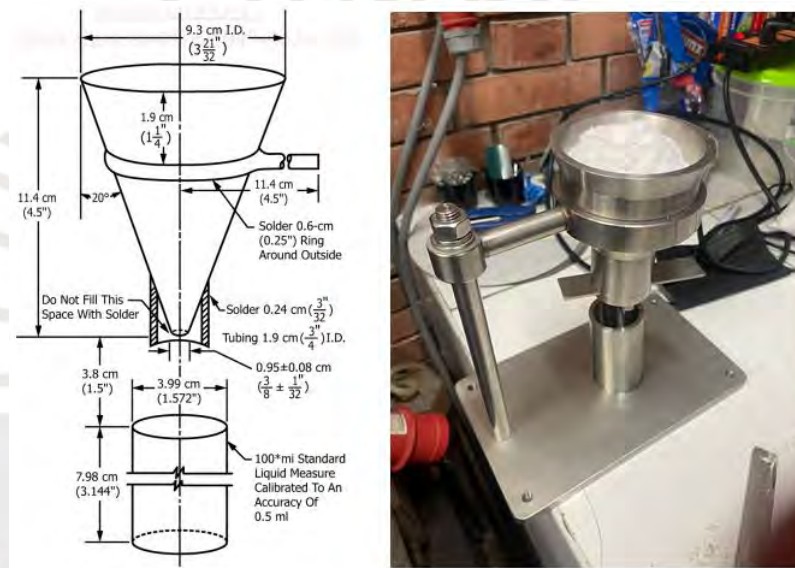


Figura 13. Aparato para prueba de densidad aparente, método A (ASTM, 2017)

2.5.2. Granulometría

La ejecución del ensayo granulométrico se lleva a cabo en el equipo electrónico Vibratory Sieve Shaker AS 200 basic (Figura 14) estructurado de acuerdo al método de prueba ASTM D1921-18 titulado “*Standard Test Methods for Particle Size (Sieve Analysis) of Plastic Materials*”, con el cual se puede analizar el tamaño de las partículas de polvo plástico y determinar la cantidad de partículas con un tamaño de 90 μm, 150 μm, 212 μm, 300 μm, 425 μm, 500 μm y 600 μm. El equipo está compuesto por tamizadores que vibran uniformemente al ser accionado durante un tiempo determinado que para la presente investigación es de 5 minutos, los cuales irán permitiendo el paso de las partículas según su tamaño, para finalmente hallar una curva de distribución del tamaño de partícula.



Figura 14. Vibratory Sieve Shaker AS 200 basic (Retsch, 2024)

2.5.3. Microscopía Electrónica de Barrido

La caracterización morfológica de las partículas pulverizadas se realizó mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), utilizando un equipo operado bajo condiciones controladas como se observa en la Figura 15. Las imágenes fueron tomadas a diferentes niveles de aumento, en un rango que abarcó desde 25x hasta 600x, con voltajes de aceleración que oscilaron entre 10 kV y 15 kV, dependiendo del material y del espaciamiento entre discos de corte con el que fue procesado. La selección de los aumentos y voltajes se ajustó en función del nivel de detalle requerido para observar las características superficiales de cada muestra. Este procedimiento permitió obtener micrografías de alta resolución, fundamentales para evaluar la morfología de los polvos, identificar irregularidades como colas o aglomeraciones, y determinar si las partículas presentaban una estructura adecuada según lo reportado en la literatura especializada para su uso en procesos como el moldeo rotacional.

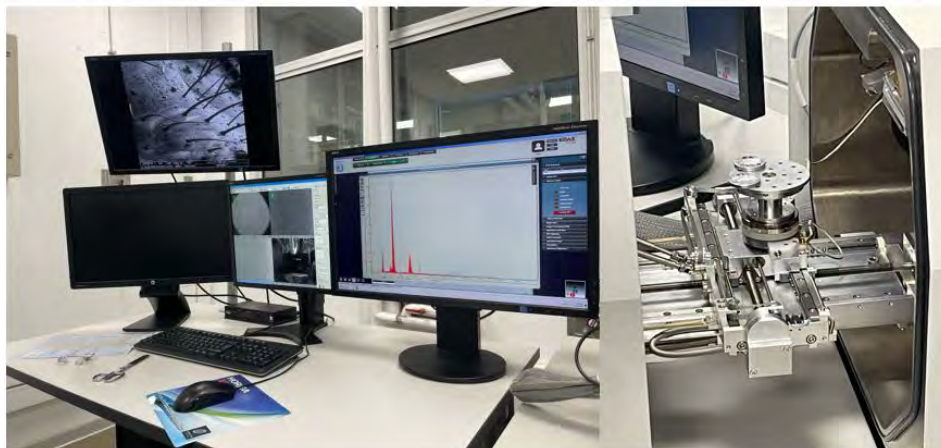


Figura 15. Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) – Pontificia Universidad Católica del Perú

2.5.4. Fluides

La determinación del índice de fluides (MFI) se realizó conforme a la norma ASTM D1238, que establece las condiciones de ensayo para evaluar la facilidad de flujo de materiales termoplásticos fundidos bajo parámetros específicos de carga (Figura 16.B) y temperatura. Para el HDPE se utilizó una temperatura de 190 °C con una carga de 2.16 kg, para el HIPS una temperatura de 200 °C con 5 kg de carga y para el PVC rígido 190 °C con una carga de 21.6 kg. El procedimiento consistió en precalentar el equipo hasta alcanzar la temperatura correspondiente, introducir el polvo plástico y realizar una extrusión preliminar para estabilizar el flujo (Figura 16.A). Posteriormente, se programó el sistema de corte para obtener siete segmentos extruidos con un intervalo de 20 segundos entre cada uno. Las muestras recolectadas fueron pesadas individualmente y con los datos obtenidos se calculó el índice de fluides promedio.

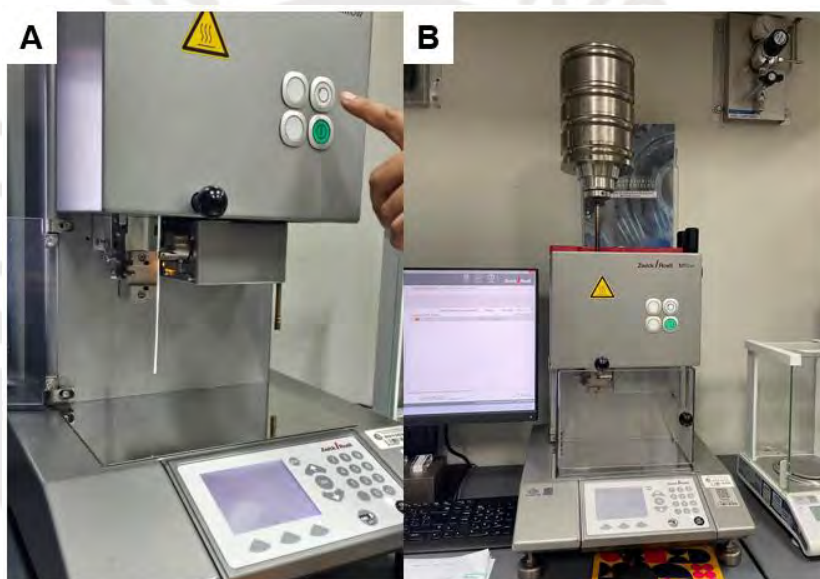


Figura 16. Plastómetro de extrusión: A. Extrusión preliminar. B. Aplicación de carga - Pontificia Universidad Católica del Perú

2.5.5. Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)

Para la caracterización química de los materiales poliméricos utilizados en esta investigación se empleó espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), mediante la técnica de reflectancia total atenuada (ATR) con cristal de diamante. El equipo utilizado fue un espectrómetro Tensor 27 de la marca Bruker Optik GmbH (Figura 17), que permite obtener espectros de absorción infrarroja a partir de las vibraciones moleculares características de cada polímero. Se analizaron retazos representativos de los materiales en su estado crudo, sin trituración previa, los cuales fueron colocados directamente sobre el cristal del equipo. Posteriormente,

los espectros obtenidos fueron comparados con bibliotecas internas de referencia disponibles en el sistema, con el fin de identificar las bandas de absorción correspondientes a cada tipo de plástico.

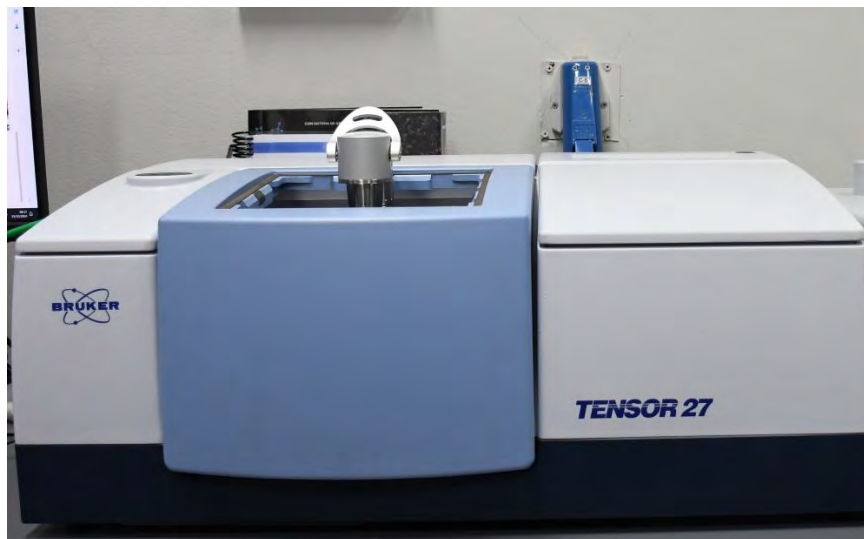


Figura 17. Espectrómetro infrarrojo Tensor 27- Pontificia Universidad Católica del Perú



CAPÍTULO III

RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir de los ensayos experimentales aplicados a los materiales pulverizados, cuyos procedimientos fueron descritos en el capítulo anterior. La información se organiza por tipo de material con el fin de facilitar el análisis comparativo y reconocer cómo cada polímero respondió frente a las condiciones operativas empleadas durante el proceso.

3.1. HDPE (POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD)

3.1.1. Ensayo de FTIR

El espectro FTIR obtenido del material identificado como HDPE (Figura 18) muestra una concordancia clara con el perfil espectral de referencia para este polímero. Se evidencian bandas de absorción intensas entre 2950 y 2850 cm^{-1} , correspondientes a los modos de estiramiento (stretching) de los enlaces C–H del grupo metileno ($-\text{CH}_2-$), así como una banda de deformación (bending) ubicada cerca de 1470 cm^{-1} , lo cual es característico del HDPE sin modificaciones estructurales relevantes (Torres, d’Almeida, & Habas, 2004). En este espectro no se observan señales intensas entre 3200 – 3400 cm^{-1} ni en el rango de 1550 – 1700 cm^{-1} , lo que indica ausencia de grupos hidroxilo ($-\text{OH}$) o carbonilo ($\text{C}=\text{O}$) que podrían sugerir humedad superficial o degradación oxidativa.

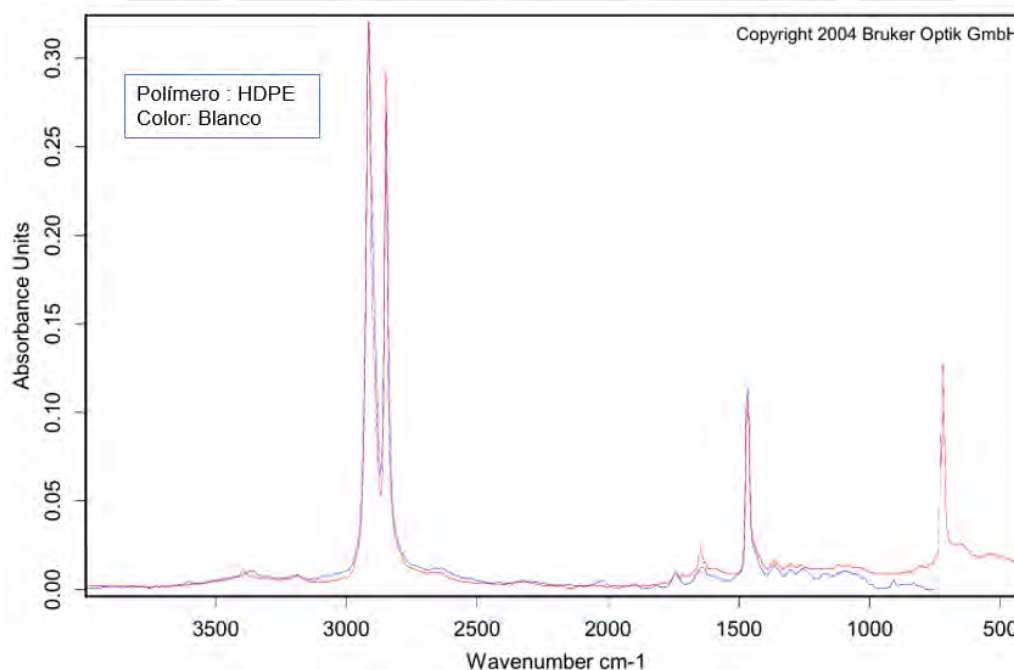


Figura 18. Curva de absorción FTIR correspondiente al HDPE reciclado

3.1.2. Pulverizado de material

Para el desarrollo del pulverizado del material HDPE, se seleccionaron 3 kilogramos de material triturado para ser pulverizado. Se observa en la Figura 19, que la cantidad material no pulverizado obtenido con respecto a la cantidad de material de ingreso a diferentes espaciamentos entre los discos de corte es variado, evidenciando una clara tendencia a la pérdida de entre 68 a 79% de material ingresante a 50% RPM del motor.

Para el espaciamiento máximo, se observa (Figura 19) que hay una menor pérdida de material (45.38% de material triturado) para la condición de operación a 100% RPM del motor y 75% velocidad de alimentación. Además, es observado que a una velocidad de alimentación de 75% para los 3 casos donde se han variado las RPM del motor, se llegó a pulverizar ligeramente un mayor porcentaje del material de ingreso. Las temperaturas máximas que se han registrado no presentan un comportamiento en particular; sin embargo, a 75% de las RPM del motor a una velocidad de alimentación del 100%, se llegó a identificar el mayor valor de temperatura máxima que es 30°C.

Para el espaciamiento intermedio, se observa que hay una menor pérdida de material para la condición de operación a 100% RPM del motor y 100% velocidad de alimentación (41.53% de material triturado). Además, es observado que a una velocidad de alimentación de 100% para los 3 casos donde se han variado las RPM del motor, se llegó a pulverizar ligeramente un mayor porcentaje del material de ingreso. Las temperaturas máximas que se han registrado se encuentran alrededor de los 30°C; sin embargo, a 75% de las RPM del motor a una velocidad de alimentación del 100%, se llegó a identificar el mayor valor de temperatura máxima que es 33°C.

Para el espaciamiento mínimo, se observa que hay una menor pérdida de material para la condición de operación a 100% RPM del motor y 75% velocidad de alimentación (38.25% de material trituado). Además, es observado que a una velocidad de alimentación de 75% para los 3 casos donde se han variado las RPM del motor, se llegó a pulverizar ligeramente un mayor porcentaje del material de ingreso. Las temperaturas máximas que se han registrado se ubican en un rango de 29°C a 31 °C; sin embargo, a 75% de las RPM del motor a una velocidad de alimentación del 100%, se llegó a identificar el mayor valor de temperatura máxima que es 31°C.

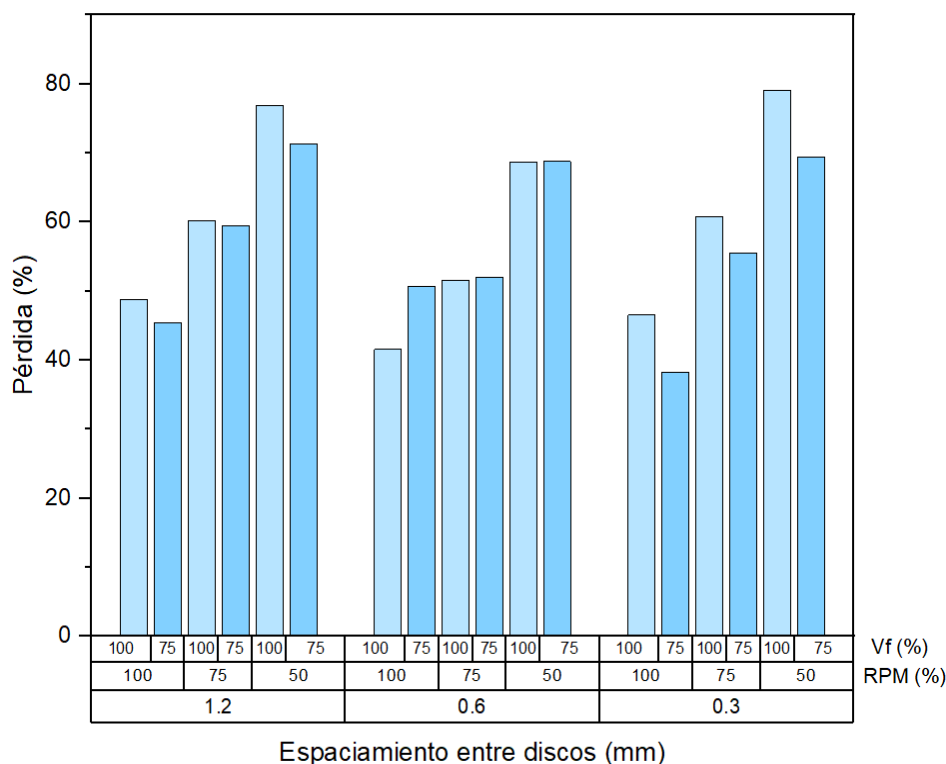


Figura 19. Cantidad de material no pulverizado por condición de operación - HDPE

3.1.3. Ensayo de Densidad Apparente

Los valores de la densidad aparente (Figura 20) calculados para las condiciones de operación, reflejan cómo las revoluciones por minuto (RPM) del motor y la tasa de alimentación, afectan la densidad aparente de los polvos producidos. El comportamiento semejante que se puede observar en todas las condiciones es una mayor densidad aparente para la condición de 100% de RPM a una velocidad de alimentación de 100%, siendo 0.245 g/ml^3 para el espaciamiento máximo, 0.25 g/ml^3 para el espaciamiento intermedio y 0.255 g/ml^3 para el mínimo espaciamiento. Sin embargo, cuando las RPM se reducen al 50 % a una velocidad de alimentación del 75% en los 3 espaciamientos, se alcanzan valores mínimos en densidad aparente de 0.175 g/ml^3 para el espaciamiento máximo, 0.19 g/ml^3 para el espaciamiento intermedio y 0.205 g/ml^3 para el mínimo espaciamiento. La variación observada en los valores de densidad aparente de los polvos de polietileno se atribuye principalmente a la morfología de las partículas obtenidas bajo las 3 condiciones de separación entre los discos de corte. En particular, el espaciamiento mínimo de 0.3 mm generó los mayores valores de densidad aparente, asociados a una morfología más compacta y una menor presencia de partículas con colas y pelos. Al ajustar el espaciamiento entre discos de corte, se facilita la formación de partículas con superficies más lisas y formas más regulares, lo que mejora el empaquetamiento del polvo y, en consecuencia, su densidad aparente.

Por el contrario, las partículas con colas y pelos tienden a formar puentes, es decir, se agrupan y traban entre sí, bloqueando el flujo del material dentro del molde, especialmente en zonas estrechas. Esto dificulta una distribución homogénea del polvo y puede provocar defectos durante el moldeo (Crawford & Trono, 2002).

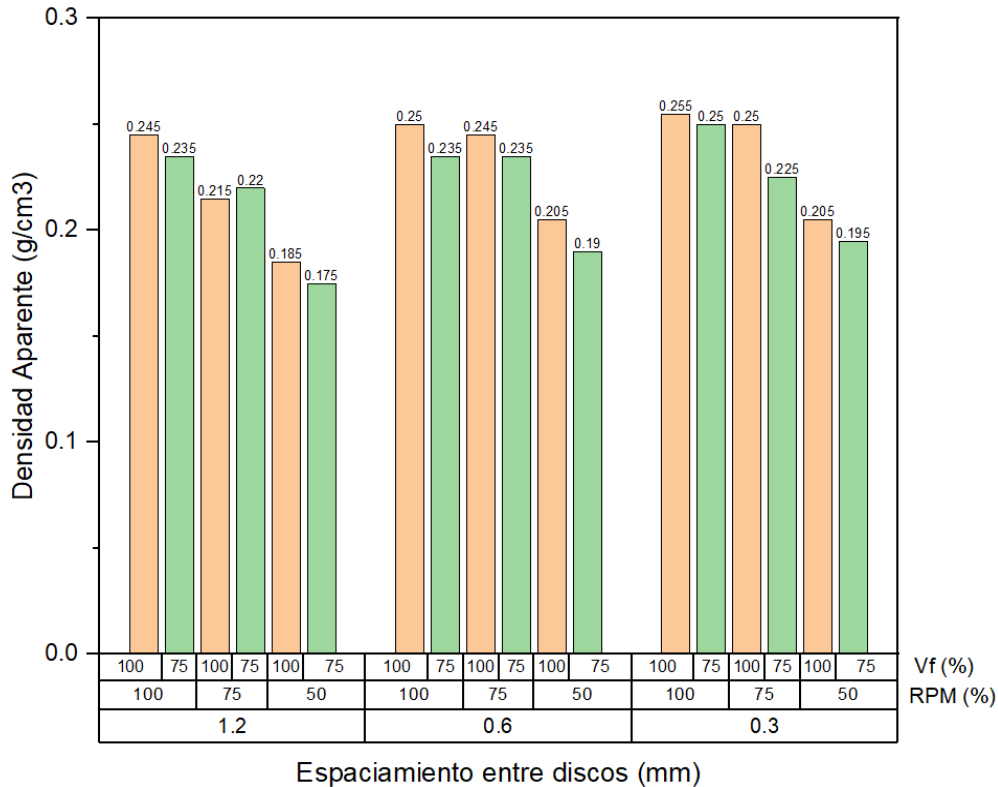


Figura 20. Valores de Densidad Apparente (g/cm³) por condición de análisis - HDPE

3.1.4. Ensayo de SEM

Se realizó un análisis morfológico de los polvos de polietileno obtenidos a través de diferentes espaciamientos entre discos de corte, utilizando microscopía electrónica de barrido (SEM) a diversos aumentos. La literatura señala que, para facilitar la densificación de los polvos durante procesos posteriores como el moldeo, es preferible que las partículas presenten una morfología casi cúbica o de tipo “huevo cuadrado”. En cambio, las partículas esféricas, aciculares o fibrosas presentan desventajas como menor densificación y peor fluidez.

Para el primer espaciamento (Figura 21), las imágenes SEM revelan partículas predominantemente de forma ovoide o tipo huevo cuadrado, aunque también se observó una proporción considerable de partículas con colas y pelos adheridos. Estas estructuras secundarias podrían ser el resultado de tensiones mecánicas elevadas durante la fragmentación del material. Las micrografías se obtuvieron a voltajes de 10 kV (aumentos de 25x, 50x, 45x, 80x, 200x y 300x) y 12.5 kV (200x y 400x).

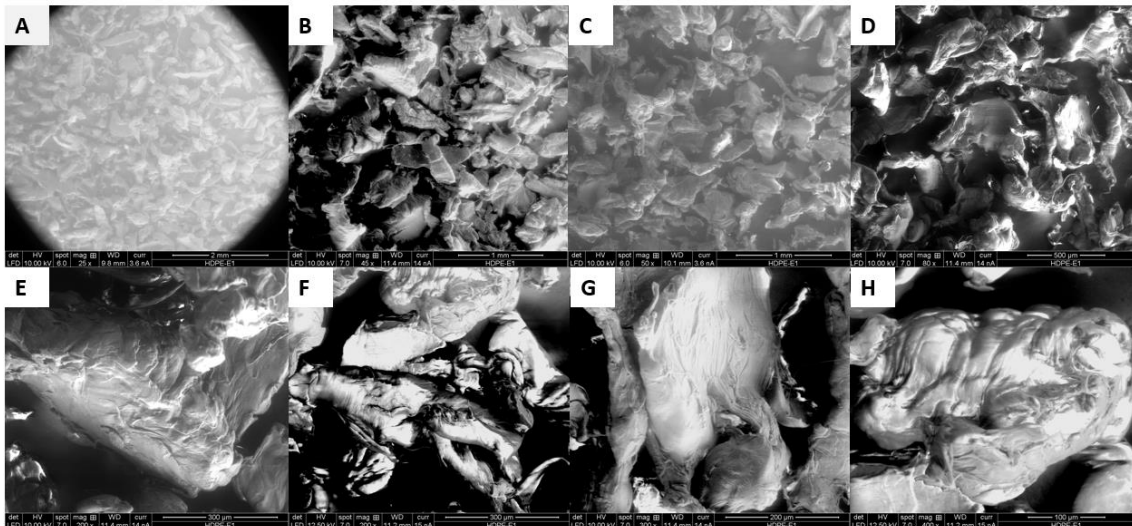


Figura 21. SEM de partículas HDPE – primer espaciamento: A. 25x (10kV) B. 45x (10kV) C. 50x (10kV) D. 80x (10kV) E. 200x (10kV) F. 200x (12.5kV) G. 300x (10kV) H. 400x (12.5kV)

En el segundo espaciamento (Figura 22), el análisis SEM a aumentos de 25x hasta 600x mostró una reducción visible en la presencia de partículas con pelos y colas. Las partículas tienden a adoptar formas más regulares, con mayor proporción de morfologías ovoides. Esto sugiere que un ajuste moderado en el espaciamento para el HDPE favorece la formación de partículas más limpias y compactas.

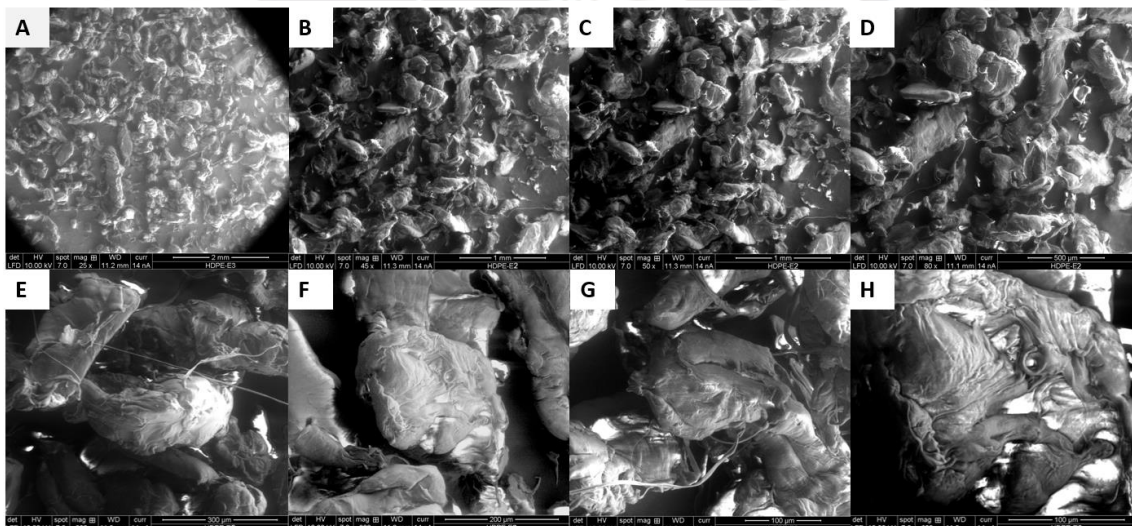


Figura 22. SEM de partículas HDPE - segundo espaciamento: A. 25x (10kV) B. 45x (10kV) C. 50x (10kV) D. 80x (10kV) E. 200x (10kV) F. 300x (10kV) G. 400x (10kV) H. 600x (10kV)

Finalmente, en el tercer espaciamento (Figura 23), las micrografías obtenidas en un rango de aumentos desde 25x hasta 600x evidencian una mayor proporción de partículas con morfología ovoide o tipo huevo cuadrado, y una drástica disminución de las partículas con colas y pelos. Esta evolución en la morfología con el aumento del espaciamento parece indicar una menor agresividad mecánica en el corte, lo que genera partículas con mayor densidad aparente y más aptas para procesos de moldeo.

Cabe destacar que las partículas con colas y pelos pueden inducir problemas como menor densidad aparente como se observó en determinadas condiciones en la sección 3.1.3, fluidez deficiente y defectos en el moldeo, lo cual reafirma la importancia de controlar la morfología mediante parámetros de proceso como el espaciamiento entre discos.

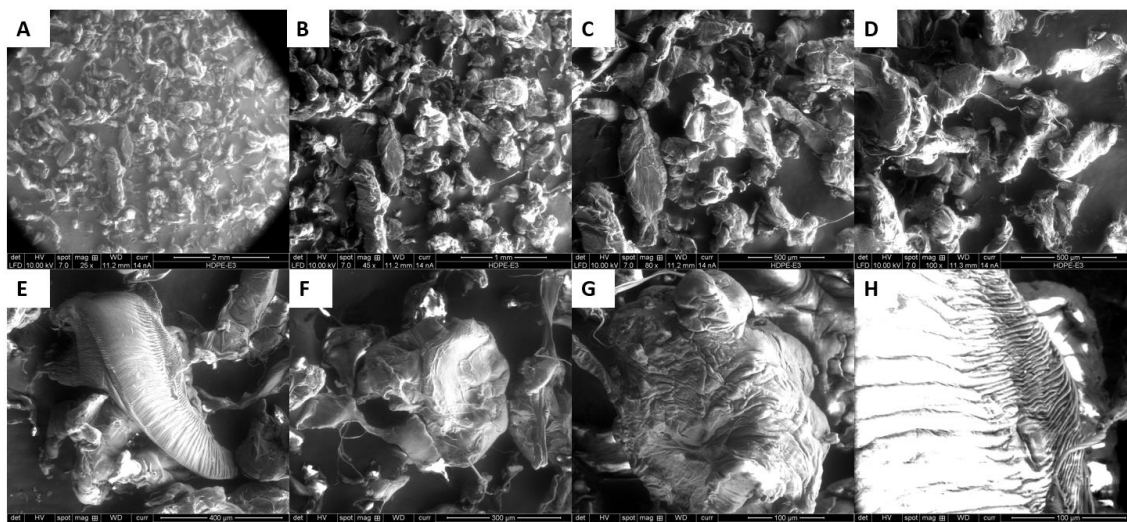


Figura 23. SEM de partículas HDPE - tercer espaciamiento: A. 25x (10kV) B. 45x (10kV) C. 80x (10kV) D. 100x (10kV) E. 180x (10kV) F. 200x (10kV) G. 400x (10kV) H. 600x (10kV)

3.1.5. Ensayo de Granulometría

Posteriormente de haberse realizado los distintos procesos de pulverización bajo variadas combinaciones de velocidad de rotación y alimentación, se seleccionaron tres condiciones específicas para su evaluación granulométrica, bajo condiciones de 100 % de velocidad de alimentación (V_f) y 100 % de velocidad de rotación (RPM), considerando tres configuraciones correspondientes a los espaciamientos máximo, medio y mínimo entre discos de corte. Estas muestras fueron elegidas por presentar los mayores valores de densidad aparente y una morfología favorable observada mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). En los tres casos como se observa en la Figura 24, la mayor proporción del material retenido se concentra en los rangos intermedios de 425–300 μm y 300–212 μm , lo que evidencia una distribución centrada favorable. Esta tendencia es coherente con la literatura que define como rango óptimo de tamaño de partículas a los polvos ubicados entre malla 200 (75 μm) y malla 35 (500 μm) (Crawford & Trono, 2002), ya que partículas por debajo de 75 μm tienden a fluidizarse en exceso y formar puentes en zonas angostas durante el llenado y moldeo, mientras que aquellas superiores a 500 μm requieren mayores tiempos de horneado y producen piezas con mayor porosidad, comprometiendo la densidad y la integridad estructural (Throne & Sohn, 1989).

No obstante, se identificaron diferencias en el tamaño promedio de partícula, que guardan relación con la forma de las curvas obtenidas. La muestra e1

(espaciamiento máximo) presentó el mayor valor, 307.42 μm , junto con una curva más ancha y dispersa (Figura 24.A), lo cual refleja una eficiencia de corte limitada y una mayor proporción de partículas gruesas ($>400 \mu\text{m}$). Este comportamiento sugiere que, con un mayor espaciamiento, el material experimenta un menor grado de ruptura durante el proceso, generando una distribución menos uniforme. En cambio, las muestras e2 (295.99 μm) y e3 (298.435 μm) mostraron curvas más centradas en los rangos intermedios, con una distribución más homogénea. Sin embargo, en la muestra e3 se aprecia una mayor dispersión en la curva de distribución (Figura 24.C), lo que indica una distribución menos uniforme en comparación con e2 (Figura 24.B); este comportamiento es coherente con su tamaño promedio ligeramente superior. No obstante, es importante precisar que el tamaño promedio de partícula no es un parámetro determinante para definir la calidad del polvo, ya que no refleja por sí solo el comportamiento del material durante su manipulación. Por ello, será necesario complementar este análisis con un ensayo de índice de fluidez, dado que la capacidad de fluir es el criterio más representativo para evaluar el desempeño del polvo en procesos de moldeo.

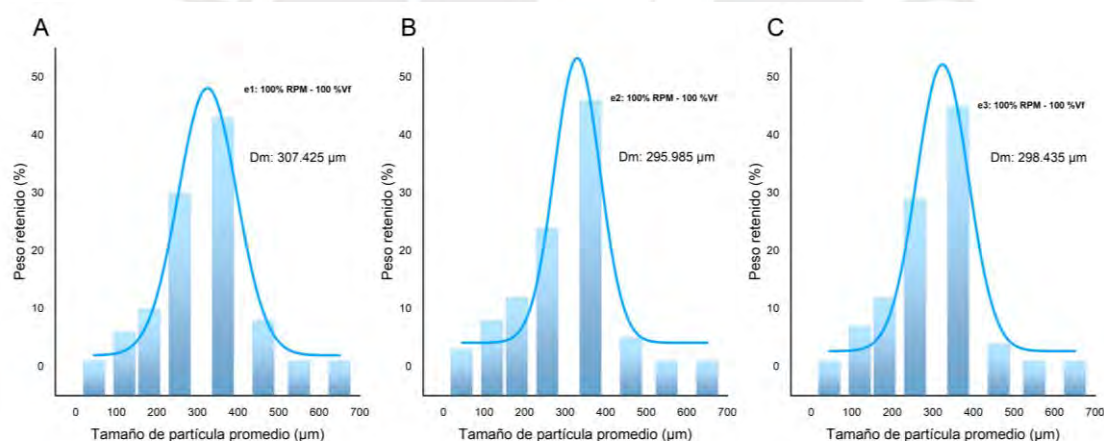


Figura 24. Curva de distribución granulométrica - HDPE: A. e1, 100% RPM, 100% Vf. B. e2, 100% RPM, 100% Vf. C. e3, 100% RPM, 100% Vf

3.1.6. Ensayo de Índice de Fluidez

El índice de fluidez de los polvos (IFM), medido en g/10 min, mostró valores muy similares para las tres condiciones evaluadas (Figura 25): 1.6 g/10 min para los espaciamientos de 1.2 mm (e1) y 0.6 mm (e2), y 1.5 g/10 min para el espaciamiento de 0.3 mm (e3). Aunque la muestra e3 presentó el valor más bajo, este comportamiento puede interpretarse positivamente, ya que, para la mayoría de los polímeros, una menor fluidez está asociada a una mayor viscosidad en estado fundido, lo cual indica un mayor peso molecular. Esta condición se relaciona directamente con mejores propiedades

mecánicas, como una mayor resistencia al impacto y una mayor tenacidad, características particularmente deseables en tecnologías como el moldeo rotacional, donde se requiere una alta integridad estructural en la pieza final (Crawford & Trono, 2002). Desde el punto de vista del procesamiento, la fluidez también desempeña un papel relevante, ya que los polvos de flujo más fácil permiten generar paredes más uniformes, mientras que aquellos con mayor viscosidad o tendencia a formar puentes pueden ocasionar defectos de llenado y distribución irregular del espesor durante el moldeo (Throne & Sohn, 1989). La condición e3 es lo suficientemente bajo para asegurar buenas propiedades mecánicas, pero dentro de un rango aceptable para mantener una fluidez adecuada durante el proceso.

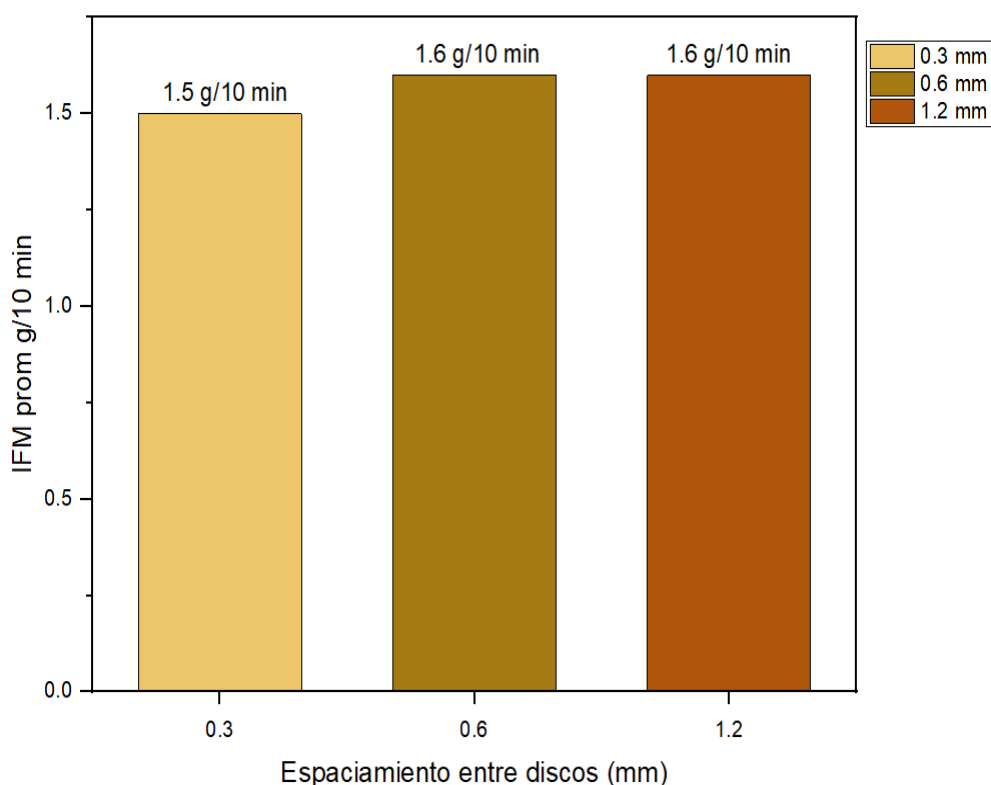


Figura 25. Valores promedio de índice de fluidez (g/10min)- HDPE

3.2. HIPS (POLIESTIRENO DE ALTO IMPACTO)

3.2.1. Ensayo de FTIR

El espectro infrarrojo obtenido para el material recuperado identificado como HIPS (Figura 26) presentó señales características que permitieron confirmar su naturaleza química. Se observaron bandas en torno a 3025 cm^{-1} , asociadas a las vibraciones de tensión de los enlaces C–H del anillo aromático, así como absorciones intensas en el rango de 1600 a 1495 cm^{-1} , correspondientes a las vibraciones del esqueleto bencénico. Adicionalmente, se registraron picos en la región de 965 a 700 cm^{-1} , vinculados a modos de vibración fuera del plano del anillo, los cuales son

distintivos del poliestireno. El perfil espectral obtenido mostró una correspondencia destacable con la referencia comercial analizada, tanto en la ubicación como en la forma relativa de las bandas más representativas. En particular, la señal cercana a 964 cm^{-1} , atribuida a la vibración C=C del butadieno trans-1,4, respalda la presencia de la fase elastomérica característica del HIPS, reforzando la asignación del material al tipo Polystyrol 456 M (Giakoumakis et al., 2023).

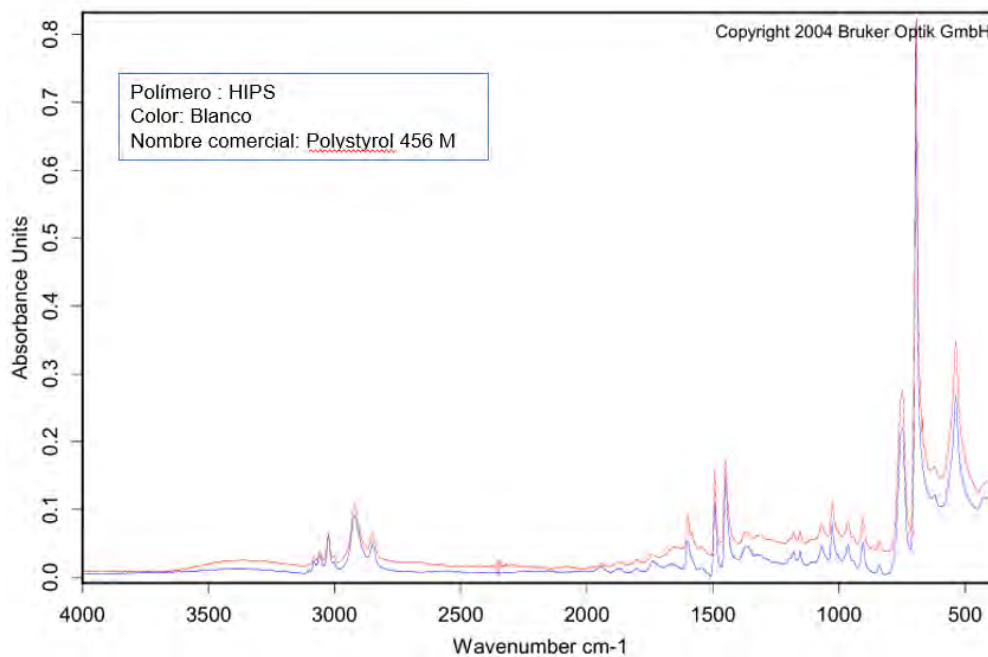


Figura 26. Curva de absorción FTIR correspondiente al HIPS recuperado

3.2.2. Pulverizado de material

Para el desarrollo del proceso de pulverizado del material HIPS, se utilizaron 3 kilogramos de material triturado por condición, y se evaluaron tres configuraciones de espaciamento entre discos de corte: 1.2 mm (máximo), 0.6 mm (intermedio) y 0.3 mm (mínimo). Se observó en la Figura 27, que la eficiencia de pulverizado, medida como el porcentaje de pérdida de material varió significativamente con los cambios en las condiciones operativas.

En el caso del espaciamento máximo de 1.2 mm, se identificó que la menor pérdida de material ocurrió bajo la condición de 100% de RPM del motor y 75% de velocidad de alimentación, alcanzando un 72.625% de aprovechamiento del material. Además, se notó una leve mejora en la eficiencia al mantener constante la velocidad de alimentación en 75% a través de diferentes niveles de RPM, lo que sugiere que este parámetro tiene influencia sobre el proceso. Las temperaturas registradas oscilaron entre $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $29\text{ }^{\circ}\text{C}$, sin una tendencia clara, aunque el valor más alto ($30\text{ }^{\circ}\text{C}$) se registró a 75% de RPM y 100% de velocidad de alimentación.

Para el espaciamiento intermedio de 0.6 mm, la condición más favorable fue la de 100% de RPM y 75% de velocidad de alimentación, con un 78.725% de aprovechamiento. En general, se observó una mayor eficiencia de pulverizado al incrementar la velocidad de alimentación al 100%, independientemente del valor de RPM. Las temperaturas se mantuvieron entre 25 °C y 30 °C, siendo el mayor valor registrado (30 °C) también a 100% de RPM y 100% de velocidad de alimentación.

En cuanto al espaciamiento mínimo de 0.3 mm, la mayor eficiencia se alcanzó con la combinación de 100% de RPM y 75% de velocidad de alimentación, donde se obtuvo un 79.47% de material pulverizado. Esto indica que, a pesar del menor espaciamiento, la eficiencia no disminuye necesariamente, siempre que se optimicen las condiciones de operación. Las temperaturas estuvieron entre 29 °C y 32 °C, siendo esta última la máxima registrada en esta configuración.

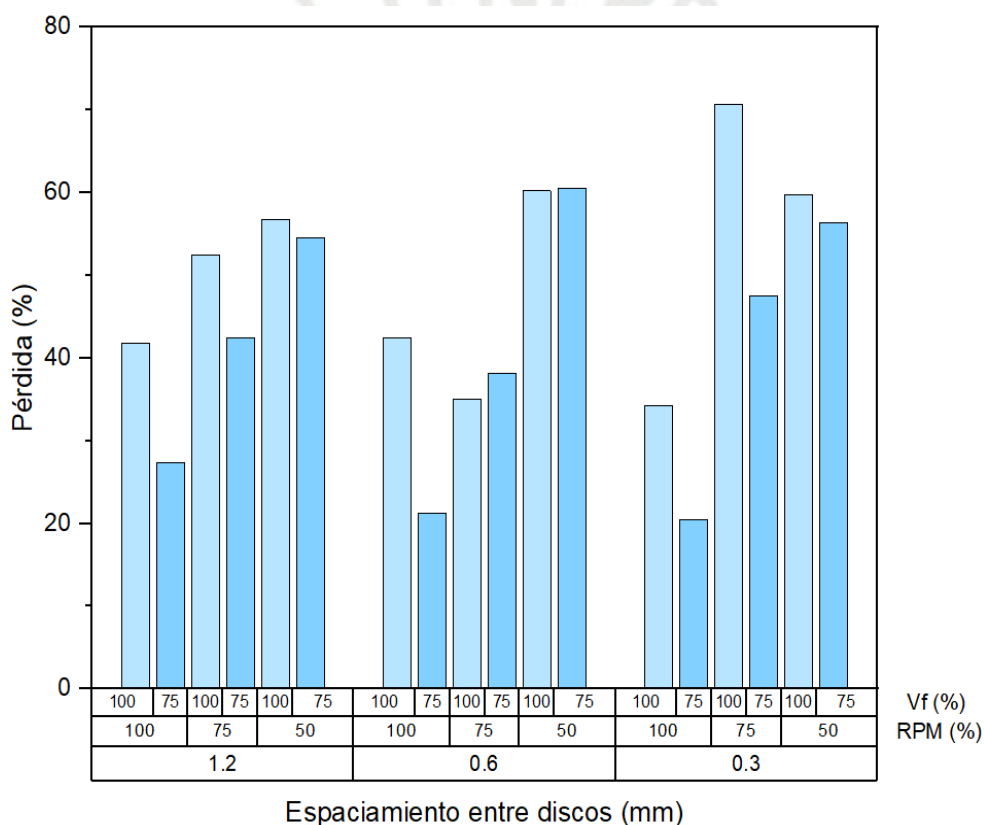


Figura 27 Cantidad de material no pulverizado por condición de operación - HIPS.

3.2.3. Ensayo de Densidad Aparente

Los mayores valores obtenidos de densidad aparente (Figura 28) para las muestras analizadas fueron de 0.500 g/cm³ para la primera muestra (espaciamiento máximo), 0.550 g/cm³ para la segunda (espaciamiento intermedio), y 0.515 g/cm³ para la tercera (espaciamiento mínimo). Esta variación se encuentra estrechamente relacionada con la morfología de las partículas, que será observada mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) en la siguiente sección.

En particular, el valor más alto registrado en la muestra con espaciamiento intermedio, bajo condiciones de 100% de RPM y 100% de velocidad de alimentación, esto refleja que los polvos presentan una mejor compactación y correcta distribución de las partículas dentro del cono de medición. Además, sugiere que dicha configuración genera partículas con una morfología favorable.

Para el espaciamiento máximo en la condición de 100% RPM y 100% Vf, se obtuvo un valor ligeramente menor al del espaciamiento medio, evidenciando una menor compactación entre las partículas, lo cual posiblemente se encuentre relacionado con el tamaño o morfología irregular de estas partículas.

Para el espaciamiento mínimo, se registró una densidad aparente de 0.515 g/cm³, el valor más bajo entre las tres configuraciones. Este resultado puede asociarse a una mayor generación de partículas con formas irregulares o bordes poco definidos debido al corte excesivo, lo cual podría haber dificultado su empaquetamiento eficiente, afectando negativamente la densidad alcanzada.

Cabe señalar que, en términos generales, una densidad aparente más baja puede reflejar una estructura interna menos compacta del lecho particulado, lo que, si bien no es concluyente por sí solo, puede influir en la generación de poros o vacíos en etapas posteriores como el moldeo rotacional, donde la capacidad del polvo para distribuirse homogéneamente y fundirse sin dejar espacios es crucial para la calidad final de la pieza moldeada.

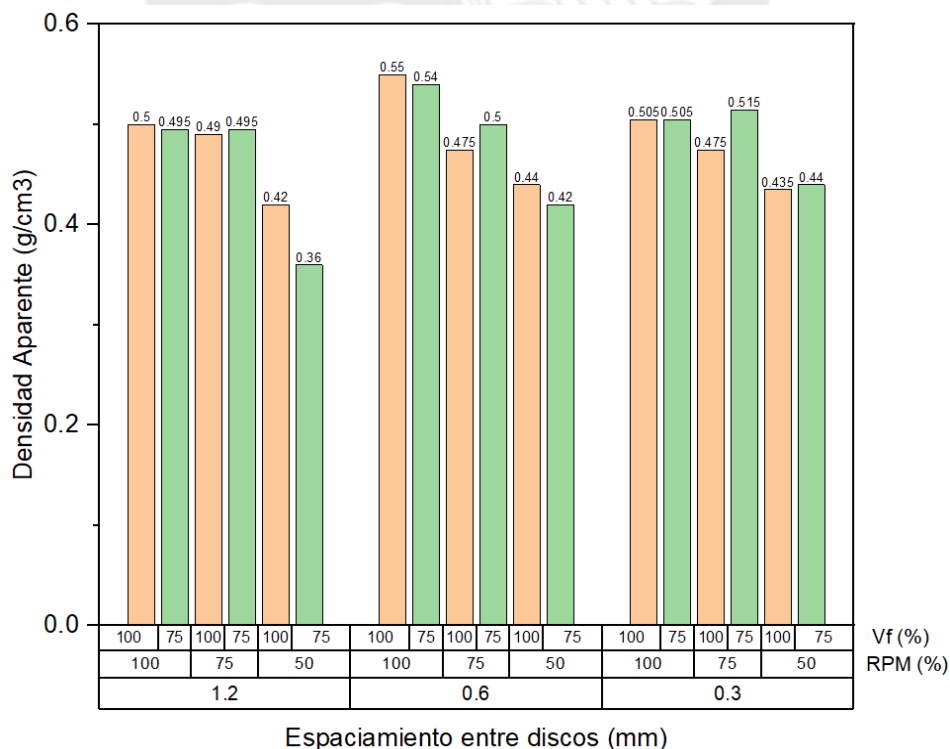


Figura 28. Valores de Densidad Aparente (g/cm³) por condición de análisis – HIPS

3.2.4. Ensayo de SEM

Como parte del estudio experimental, se llevó a cabo el análisis morfológico de los polvos obtenidos en el pulverizado del PS mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). Este análisis permitió comprender la influencia de los parámetros sobre la forma y superficie de las partículas generadas. En el primer ensayo, correspondiente a la muestra obtenida con espaciado máximo (1.2 mm) bajo condiciones de 100% de RPM del motor y 100% de velocidad de alimentación (Figura 29), se identificaron algunas partículas con morfología tipo huevo cuadrado, lo cual coincide con lo reportado en la literatura como un indicador de partículas de alta calidad para moldeo rotacional. No obstante, se observó una mayor proporción de partículas con colas o filamentos adheridos, consideradas como imperfecciones no deseadas, ya que afectan negativamente la fluidez y densificación del polvo durante el proceso de conformado. Las micrografías correspondientes a este ensayo se obtuvieron a 10 kV, empleando aumentos de 25x, 40x, 50x, 80x y 200x, lo cual permitió una adecuada caracterización de la morfología superficial de las partículas.

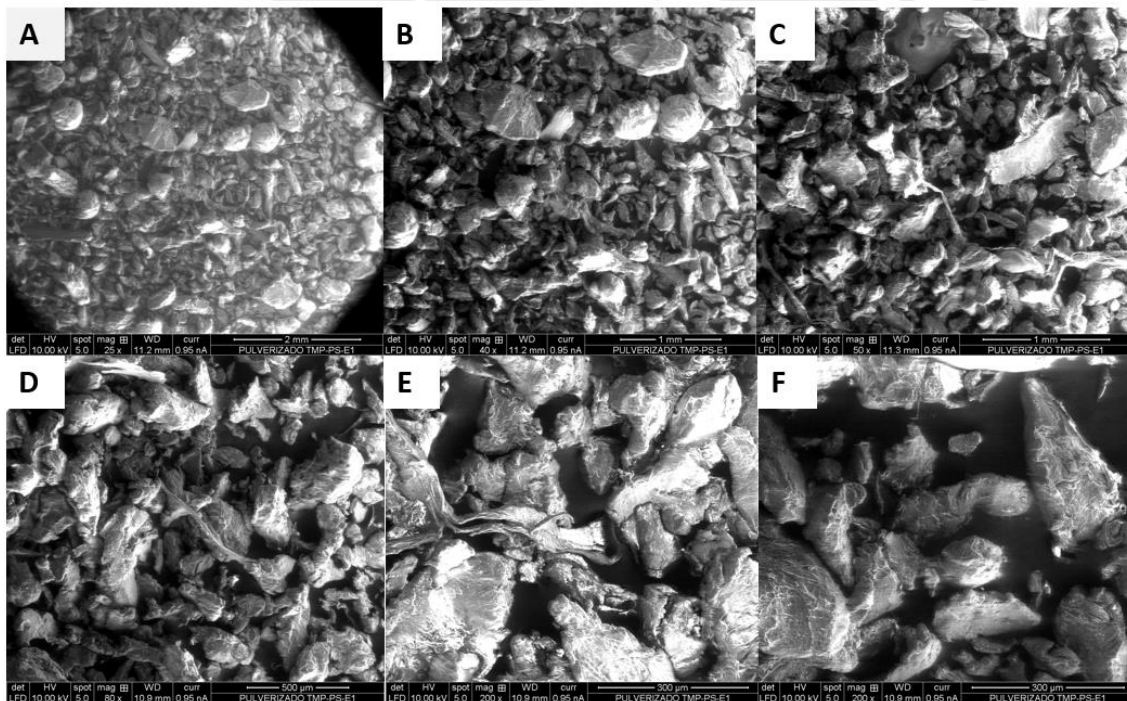


Figura 29. SEM de partículas HIPS - primer espaciado: A. 25x (10kV) B. 40x (10kV) C. 50x (10kV) D. 80x (10kV) E. 200x (10kV) F. 200x (10kV)

El segundo ensayo se llevó a cabo sobre la muestra generada con espaciado intermedio (0.6 mm), también bajo condiciones de 100% de RPM y 100% de velocidad de alimentación (Figura 30). En este caso, se observó una mayor proporción de partículas con morfología tipo huevo cuadrado, en comparación con la

cantidad de partículas pequeñas con colas o imperfecciones superficiales. Este hallazgo sugiere que las condiciones de esta segunda configuración favorecen la obtención de polvos de mayor calidad y confirman la influencia de la morfología en el cálculo de la densidad aparente, aspecto que se espera tenga un impacto positivo en los ensayos de moldeo posteriores. Para esta muestra, las imágenes SEM se obtuvieron a 10 kV, con aumentos de 25x, 45x, 50x y 200x.

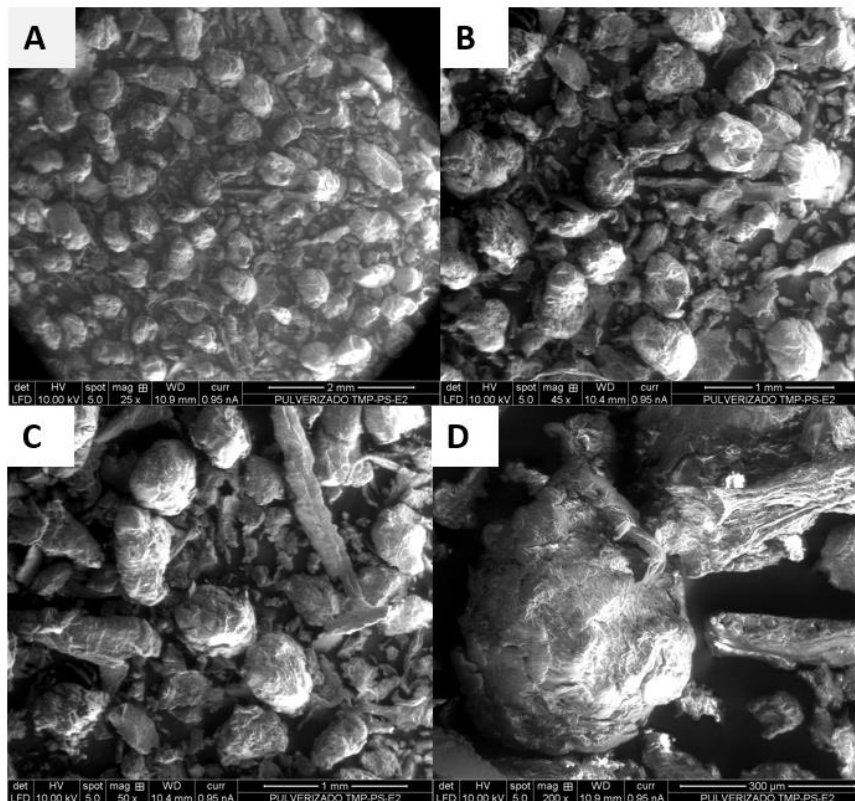


Figura 30. SEM de partículas HIPS - segundo espaciamento: A. 25x (10kV) B. 45x (10kV) C. 50x (10kV) D. 200x (10kV)

Finalmente, en el tercer ensayo, correspondiente a la muestra obtenida con espaciamento mínimo (0.3 mm) y condiciones de 75% de RPM del motor y 75% de velocidad de alimentación (Figura 31), se observaron partículas de tamaño más fino, pero con superficies visiblemente más rugosas y desgarradas. Varias de ellas presentaban colas o estructuras filamentosas, lo que indica un proceso de fragmentación menos controlado y potencialmente más agresivo. Estas características permiten inferir que, bajo esta condición, la calidad morfológica del polvo se ve comprometida, ya que predominan formas indeseadas que podrían limitar su aplicación en procesos de moldeo rotacional. Las micrografías correspondientes a este ensayo se tomaron a 10 kV, con aumentos de 25x, 45x, 50x, 80x, 160x y 400x, lo que permitió una observación más detallada de las imperfecciones superficiales.

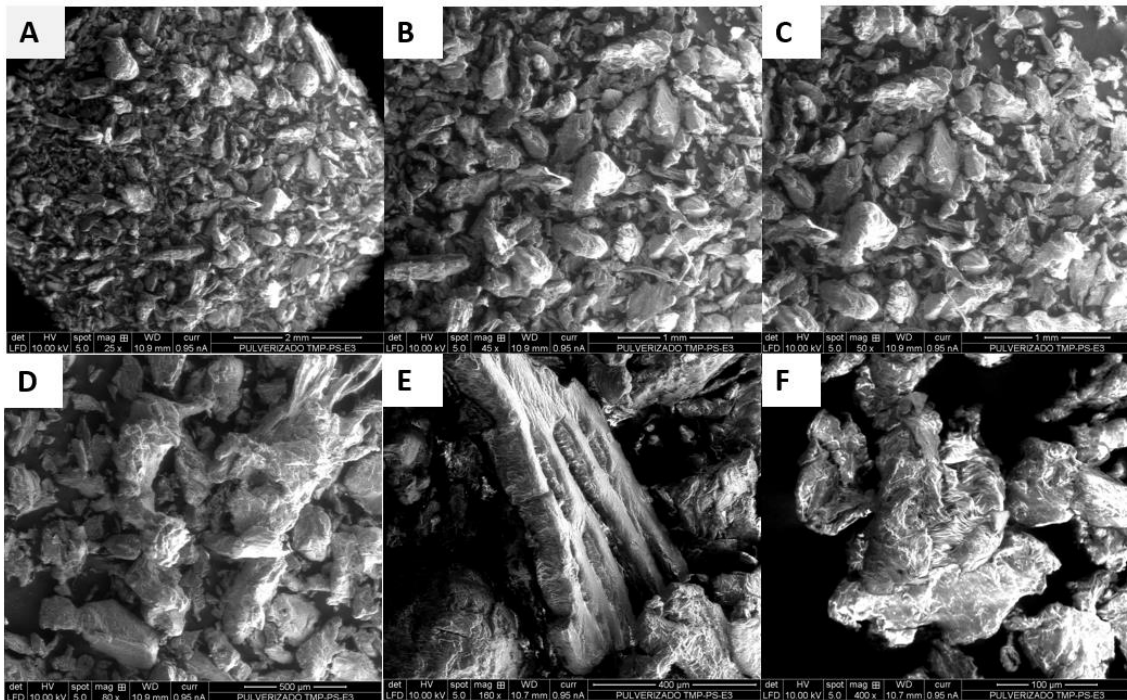


Figura 31. SEM de partículas HIPS - tercer espaciamento: A. 25x (10kV) B. 45x (10kV) C. 50x (10kV) D. 80x (10kV) E. 160x (10kV) F. 400x (10kV)

3.2.5. Ensayo de Granulometría

Posterior a los distintos ensayos de pulverización realizados bajo combinaciones controladas de velocidad de rotación (RPM) y alimentación (Vf), se seleccionaron tres condiciones específicas para la evaluación granulométrica, con el objetivo de caracterizar la distribución del tamaño de partícula de los polvos obtenidos. Las muestras seleccionadas corresponden a las condiciones operativas: e1 (espaciamento máximo, 100 % RPM – 100 % Vf), e2 (espaciamento intermedio, 100 % RPM – 100 % Vf) y e3 (espaciamento mínimo, 75 % RPM – 75 % Vf). Esta elección se fundamentó en que dichas muestras presentaron los valores más altos de densidad aparente y una morfología favorable observada mediante microscopía electrónica de barrido (SEM).

El análisis granulométrico, realizado mediante tamizado mecánico en seco, abarcó un rango de tamaños desde partículas gruesas (>600 μm) hasta finas (<45 μm). En todos los casos, se observó en la Figura 32, que la mayor proporción del material retenido se concentra en los rangos intermedios (425–212 μm), lo cual sugiere una distribución centrada y controlada. Esta tendencia resulta consistente con lo señalado en la literatura técnica, donde se establece como óptimo el intervalo entre 75–500 μm (mallas 200 a 35), ya que valores por debajo de este rango tienden a fluidizarse en exceso o formar puentes, mientras que partículas superiores a 500 μm exigen mayor

tiempo de horneado y pueden contribuir a la formación de porosidades (Crawford & Trono, 2002; Throne & Sohn, 1989).

En cuanto al tamaño promedio de partícula, calculado mediante el método ponderado, se obtuvieron los siguientes valores:

- e1: 341.4 μm
- e2: 332.48 μm
- e3: 325.52 μm

La muestra e1 (Figura 32.A) presentó una distribución relativamente amplia y asimétrica, con un sesgo hacia partículas más finas y un pico en el intervalo de 300–400 μm , lo que refleja una mayor heterogeneidad en el tamaño de partícula. Esta dispersión podría comprometer la calidad del polvo, generando diferencias en los tiempos de fusión y densificación durante el moldeo. En contraste, la muestra e2 (Figura 32.B) mostró la curva más estrecha y simétrica, con un claro máximo en 400–500 μm y la densidad aparente más alta, lo que indica una distribución de partícula más homogénea y una morfología más controlada. En el caso de e3 (Figura 32.C), se observó un desplazamiento hacia tamaños más pequeños, con un pico en 200–300 μm y mayor proporción de finos, lo cual podría afectar negativamente su fluidez.

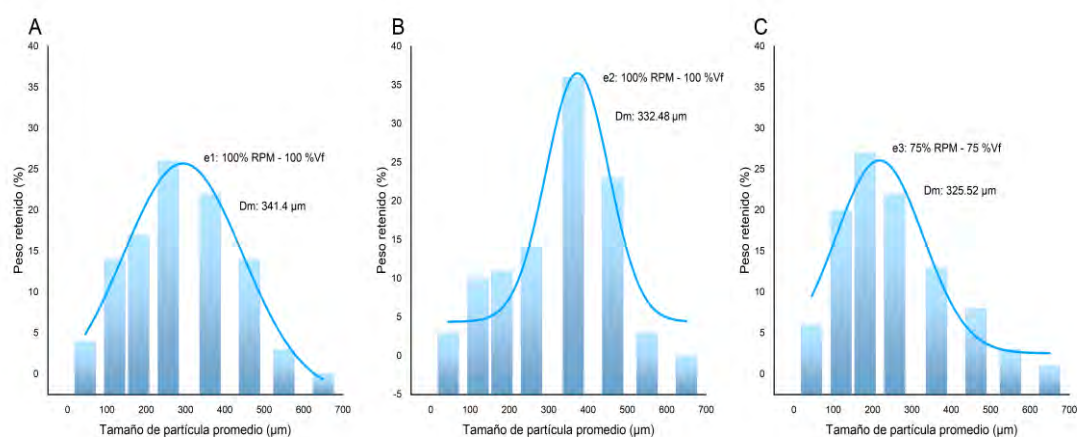


Figura 32. Curva de distribución granulométrica - HIPS: A. e1, 100% RPM, 100% Vf. B. e2, 100% RPM, 100% Vf. C. e3, 75% RPM, 75% Vf

3.2.6. Ensayo de Índice de Fluidez

En el análisis del índice de fluidez (IFM), se observó un comportamiento ascendente en los valores obtenidos tras el proceso de pulverización, en comparación con el valor del material de partida, cuyo promedio fue de 3.86 g/10 min. Luego de someter al poliestireno (PS) a distintas condiciones de molienda por disco, los valores promedio de IFM (Figura 33) resultaron ser de 4.88 g/10 min para la muestra con espaciado máximo (1.2 mm), 5.62 g/10 min para el espaciado intermedio

(0.6 mm) y 6.57 g/10 min para el espaciamiento mínimo (0.3 mm). Este aumento progresivo del IFM puede interpretarse como una señal directa de reducción del peso molecular del polímero, asociada a fenómenos de degradación mecánica durante el proceso de fragmentación.

Este tipo de degradación ha sido ampliamente documentado en la literatura especializada. El poliestireno presenta una alta susceptibilidad a la escisión térmica de sus cadenas principales incluso a temperaturas relativamente moderadas, especialmente cuando se combina con condiciones de alta fricción o cizallamiento. En este contexto, la pulverización mecánica puede generar zonas localizadas de elevadas temperaturas debido al contacto repetido entre las superficies de corte, acelerando la ruptura de enlaces y disminuyendo el peso molecular, lo cual se manifiesta como un incremento del índice de fluidez. Durante procesos como la molienda o la extrusión, el material puede estar sometido a intensas fuerzas de cizallamiento que provocan la rotura de las macromoléculas (Niaounakis, 2015).

En el presente trabajo, la condición más agresiva, correspondiente al espaciamiento mínimo de 0.3 mm y operación a 75 % de RPM, presentó el mayor valor de IFM, sugiriendo una degradación más pronunciada del material. Esta interpretación se ve reforzada por los resultados del análisis morfológico, donde se observó una gran proporción de partículas finas, superficies desgarradas y estructuras irregulares, indicios de un proceso de fragmentación intensivo y potencialmente perjudicial para la integridad del polímero.

En contraste, aunque la muestra correspondiente al espaciamiento intermedio (0.6 mm) también mostró un aumento en el índice de fluidez con respecto al material original, este se mantiene dentro de un rango moderado (5.62 g/10 min) con respecto al valor mínimo hallado (4.88 g/10 min), lo que sugiere que el polímero ha mantenido una mayor estabilidad estructural frente al tratamiento mecánico. Este resultado adquiere mayor relevancia si se considera que esta misma muestra presentó un desempeño superior en los otros ensayos característicos: un tamaño de partícula promedio más centrado (332.48 μm), la mayor densidad aparente (0.55 g/cm³), y una morfología de partículas más favorable según las micrografías SEM, con predominancia de formas cúbicas y escasa presencia de imperfecciones superficiales como colas o pelos.

En conjunto, estos hallazgos permiten considerar que, a pesar del aumento en el índice de fluidez, la muestra obtenida bajo la condición de espaciamiento intermedio representa un compromiso técnico óptimo entre calidad morfológica, fluidez reológica y procesabilidad. De hecho, es ampliamente reconocido que valores de IFM excesivamente altos pueden comprometer el desempeño del polvo durante el moldeo rotacional, al inducir fenómenos como pérdida de resistencia estructural, mayor

encogimiento o formación de poros en la pieza moldeada. Por ello, el equilibrio alcanzado en esta muestra permite suponer un comportamiento más robusto y predecible en etapas posteriores de procesamiento térmico.

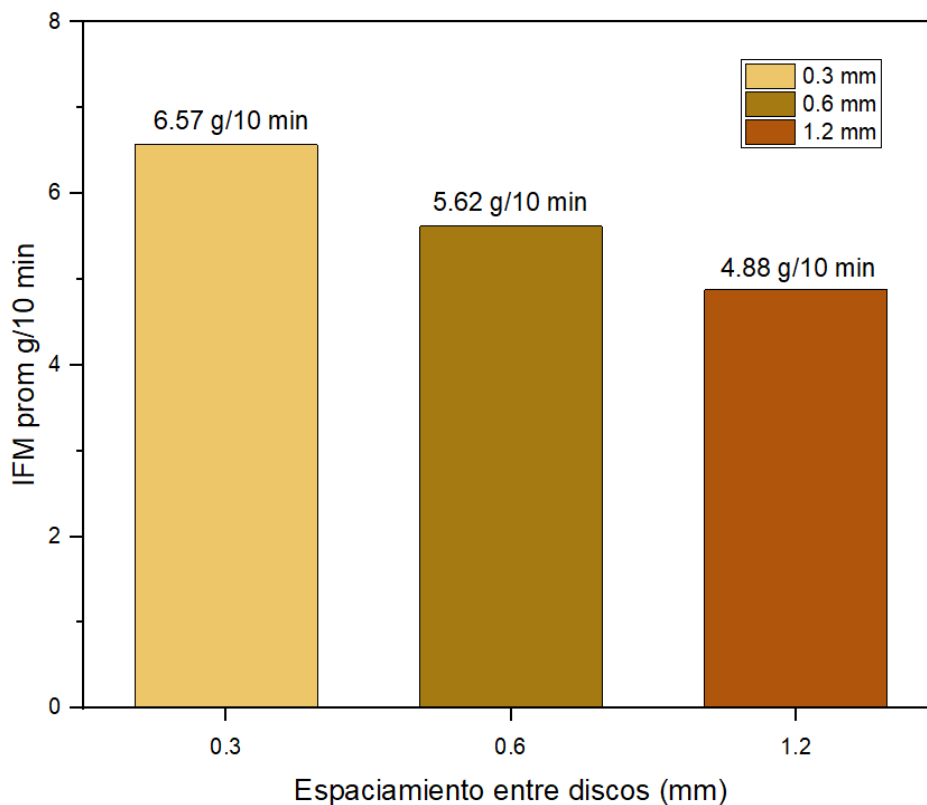


Figura 33. Valores promedio de índice de fluidez (g/10min)- HIPS

3.3. PVC rígido (Policloruro de vinilo rígido)

3.3.1. Ensayo de FTIR

El espectro FTIR correspondiente al material identificado como PVC rígido (Figura 34) mostró bandas consistentes con las estructuras típicas de este polímero. En la región de $2849\text{--}2961\text{ cm}^{-1}$, se observan picos atribuidos a las vibraciones de estiramiento de enlaces C–H presentes en grupos CH_2 y CH-Cl . Además, se identificaron bandas en 1433 cm^{-1} y 1324 cm^{-1} , asociadas a deformaciones angulares (wagging) del grupo CH_2 , junto con una señal en 1096 cm^{-1} , correspondiente al estiramiento del enlace C–C en la cadena principal del polímero. Finalmente, destacan bandas bien definidas en 686 cm^{-1} y 616 cm^{-1} , relacionadas con las vibraciones de estiramiento del enlace C–Cl, las cuales confirman la elevada concentración de átomos de cloro en la estructura del PVC (Mirowski et al., 2021). La coincidencia espectral con los datos de referencia permitió asignar este material al grado comercial Folie EZ 23 (Hoechst AG), confirmando su clasificación como policloruro de vinilo rígido.

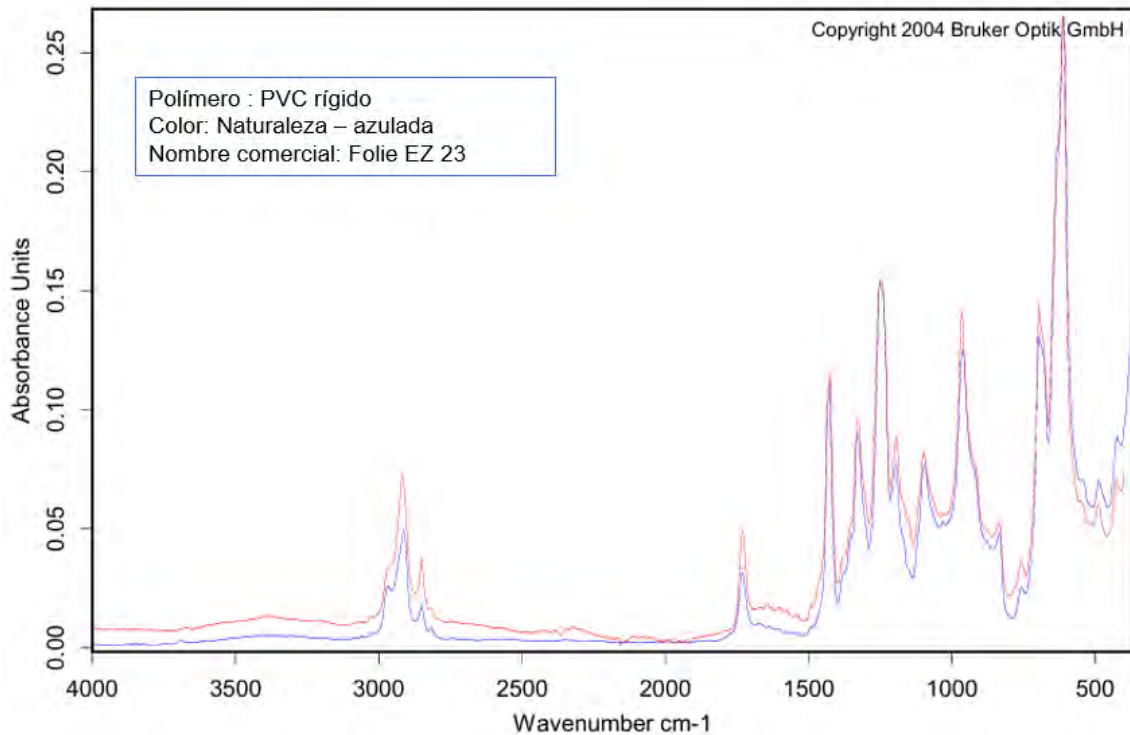


Figura 34. Curva de absorción FTIR correspondiente al PVC recuperado

3.3.2. Pulverizado de material

Para el desarrollo del proceso de pulverizado del material PVC (Figura 35), se emplearon 3 kilogramos de material triturado por condición, evaluando tres configuraciones de espaciamiento entre discos de corte: 1.2 mm (máximo), 0.6 mm (intermedio) y 0.3 mm (mínimo).

En el caso del espaciamiento máximo de 1.2 mm, la mayor eficiencia se alcanzó a 100% de RPM y 75% de velocidad de alimentación, con un 85.525% del material pulverizado. Esta condición se justifica porque la alta velocidad del motor proporciona una buena energía de corte, mientras que una alimentación moderada permite que el material permanezca el tiempo suficiente en la zona activa para ser procesado adecuadamente. En cambio, a 50% de RPM y 100% de alimentación, la pérdida de material se elevó a 87%, mostrando la menor eficiencia. Esta configuración combina baja energía de corte con un flujo excesivo de material, lo que impide que se genere suficiente fricción o presión para fragmentar el PVC, un material rígido y resistente mecánicamente. Además, el espaciamiento amplio permite que parte del material atraviese sin ser suficientemente triturado. En el espaciamiento intermedio de 0.6 mm, se alcanzó la mejor eficiencia global del estudio, con solo 9.6% de pérdida de material a 100% de RPM y 100% de alimentación. Esta condición combina un paso controlado del material con una energía de corte elevada, lo que genera una intensa acción mecánica sin provocar bloqueos o pérdida de flujo. El espaciamiento intermedio parece

ser óptimo para el comportamiento del PVC, permitiendo tanto la generación de fricción como un flujo continuo. En contraste, a 50% de RPM y 75% de alimentación, la variación fue de 76.225%. Aquí, la baja energía del motor no logra superar la resistencia del material, y el reducido flujo no compensa esta deficiencia, resultando en una pobre fragmentación. Finalmente, en el espaciamiento mínimo de 0.3 mm, la mayor eficiencia se obtuvo a 100% de RPM y 75% de alimentación, con una variación de 17.8%, equivalente a un 82.2% de material pulverizado. Esta combinación permite aprovechar la fricción generada por el reducido espacio entre discos, junto con una alimentación que no sobrecarga el sistema, favoreciendo una trituración más homogénea. Sin embargo, cuando se empleó 100% de RPM y 100% de alimentación, la variación se elevó a 39.325%, indicando que, a pesar de tener una alta velocidad, el flujo excesivo puede generar atascos o deslizamiento del material, reduciendo el efecto de corte. Además, la alta fricción en esta configuración puede incrementar la temperatura local, lo que en el caso del PVC podría provocar ablandamiento superficial, haciendo que el material se adhiera a los discos en lugar de quebrarse eficientemente. Si bien una baja variación indica una buena eficiencia de pulverizado, esto no garantiza la calidad del polvo. Esta debe evaluarse mediante ensayos de caracterización, como los realizados en los materiales previamente estudiados, considerando parámetros como la distribución y morfología de las partículas, especialmente en procesos como el moldeo rotacional.

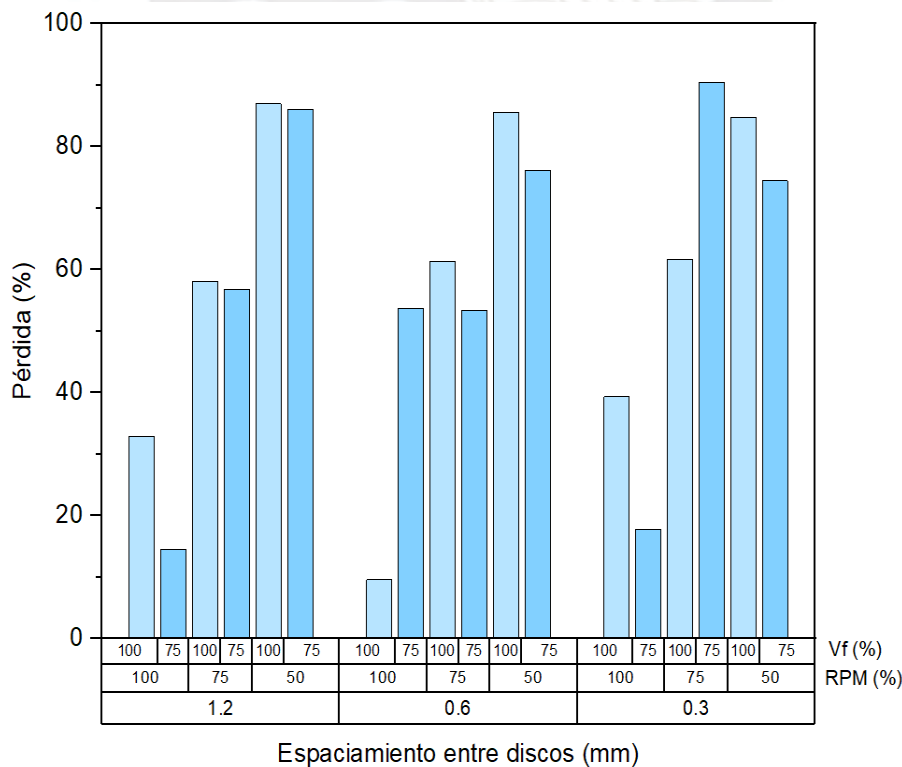


Figura 35. Cantidad de material no pulverizado por condición de operación – PVC

3.3.2. Ensayo de Densidad Aparente

Los valores de densidad aparente obtenidos para las distintas condiciones operativas evidencian diferencias asociadas a la configuración de espaciamiento entre discos, así como a las condiciones de velocidad y alimentación. En concordancia con lo reportado en la literatura, una mayor densidad aparente suele relacionarse con un mejor empaquetamiento de partículas, lo cual favorece la fluidez, la uniformidad del lecho y, potencialmente, la calidad del producto final en procesos como el moldeo rotacional. Por esta razón, se seleccionaron las condiciones con los valores más altos de densidad aparente para su análisis.

La mayor densidad aparente, como se observa en la Figura 36, fue de 0.370 g/cm^3 , obtenida con un espaciamiento mínimo de 0.3 mm , a 100% de RPM y 100% de velocidad de alimentación. Esta condición favorece una intensa acción de corte que puede generar partículas más finas, pero con geometrías compactas, permitiendo un mejor acomodo en el recipiente de medición. A pesar del menor espaciamiento, la energía cinética aportada por la alta velocidad permite una adecuada fragmentación sin generar exceso de partículas deformadas o alargadas.

En el espaciamiento intermedio de 0.6 mm , se obtuvo una densidad aparente de 0.345 g/cm^3 bajo condiciones de 100% de RPM y 100% de alimentación. Este valor elevado sugiere un balance adecuado entre tamaño y forma de partícula, lo cual favorece un empaquetamiento eficiente. Además, el paso intermedio entre discos parece generar partículas con menos imperfecciones, permitiendo una mayor compacidad en el volumen medido.

Finalmente, en el espaciamiento máximo de 1.2 mm , la densidad aparente más alta fue 0.325 g/cm^3 , obtenida también con 100% de RPM y 100% de alimentación. Aunque inferior respecto a los otros dos casos, este resultado indica que incluso con un mayor espacio entre discos es posible alcanzar una densidad moderada, siempre que se mantenga una velocidad de rotación elevada que compense la menor fricción natural del sistema.

Una menor densidad aparente, en cambio, refleja un empaquetamiento menos eficiente, lo que incrementa la posibilidad de que se generen porosidades internas durante el procesamiento térmico del polvo, afectando negativamente la integridad estructural y la calidad final del producto moldeado (Crawford & Trono, 2002).

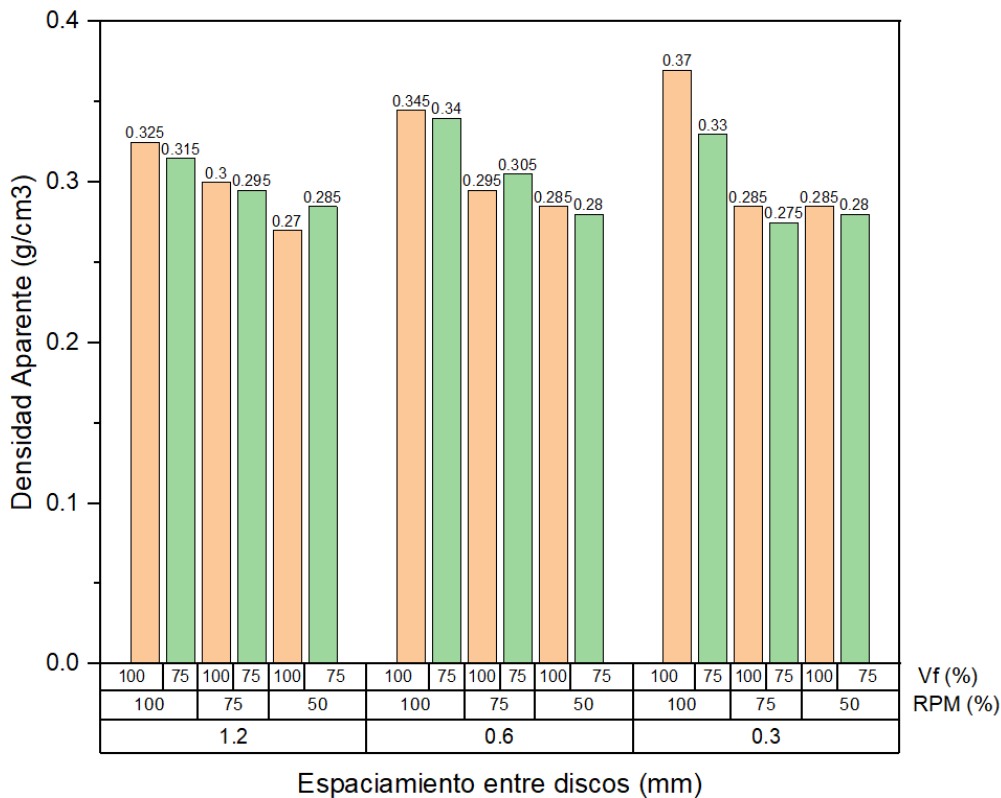


Figura 36. Valores de Densidad Apparente (g/cm³) por condición de análisis - PVC rígido

3.3.3. Ensayo de SEM

La caracterización morfológica de los polvos de PVC, realizada mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), permitió identificar cómo el espaciamiento entre discos de corte influye no solo en la forma y superficie de las partículas, sino también en la progresión de tamaños generados durante el proceso de pulverizado. En este contexto, la morfología tipo huevo cuadrado se considera la más adecuada para aplicaciones como el moldeo rotacional, ya que favorece el empaquetamiento eficiente y una fusión térmica uniforme del polvo.

Para el espaciamiento máximo (1.2 mm), las imágenes SEM se obtuvieron a 12.5 kV con aumentos de 25x, 45x, 50x, 80x y 160x, y a 10 kV para 400x (Figura 37). Bajo condiciones de 100% de RPM y 100% de velocidad de alimentación, se observó una proporción importante de partículas con morfología tipo huevo cuadrado. No obstante, la muestra presentó una transición abrupta entre partículas de gran tamaño y partículas más finas, sin una progresión intermedia bien definida. Esta discontinuidad en el tamaño puede afectar negativamente el empaquetamiento, ya que limita la capacidad de las partículas pequeñas para rellenar los vacíos generados entre las más grandes.

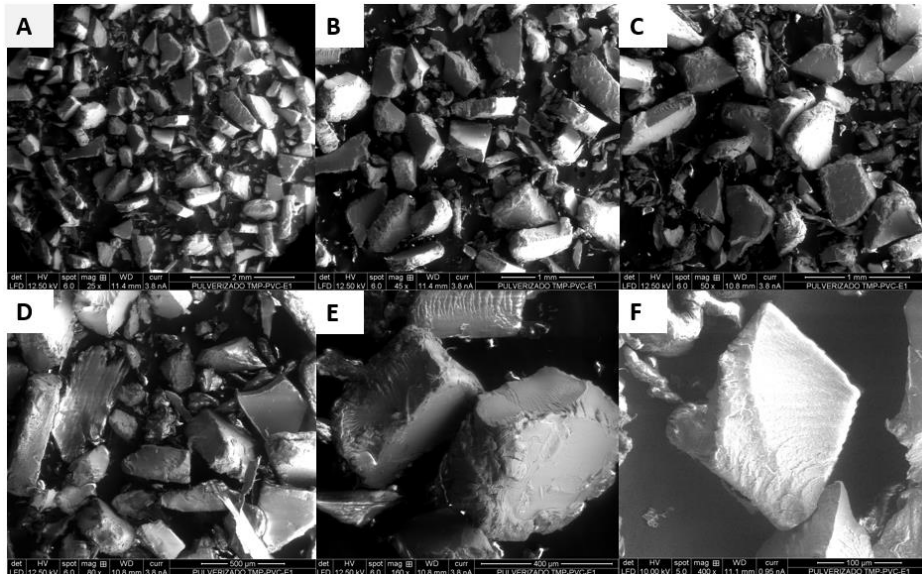


Figura 37. SEM de partículas PVC - primer espaciamento: A. 25x (12.5kV) B. 45x (12.5kV) C. 50x (12.5kV) D. 80x (12.5kV) E. 160x (12.5kV) F. 400x (10kV)

En el caso del espaciamento intermedio (0.6 mm), las micrografías fueron tomadas a 15 kV en aumentos de 25x, 45x y 80x, y a 12.5 kV para 200x (Figura 38). Se observó una alta proporción de partículas con morfología tipo huevo cuadrado, lo cual es consistente con los criterios establecidos en la literatura para polvos adecuados al moldeo rotacional. Sin embargo, la distribución de tamaños no mostró una transición tan progresiva entre partículas grandes, medianas y finas; particularmente, se evidenció una baja presencia de partículas pequeñas, lo cual puede comprometer el empaquetamiento del lecho particulado. Si bien la fragmentación fue más estable y con escasa incidencia de colas o filamentos, la limitada variedad de tamaños puede favorecer la generación de porosidades durante la etapa de conformado térmico.

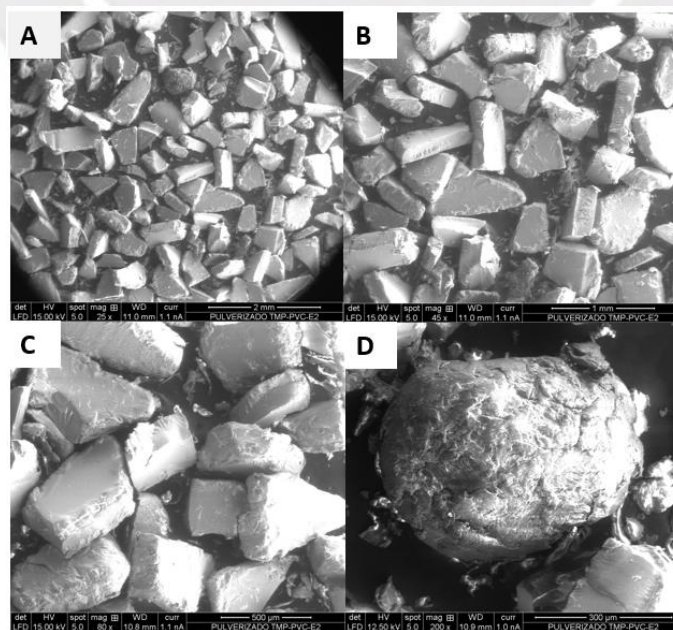


Figura 38. SEM de partículas PVC - segundo espaciamento: A. 25x (15kV) B. 45x (15kV) C. 80x (15kV) D. 200x (12.5kV)

Para el espaciamiento mínimo (0.3 mm), el análisis se realizó a 12.5 kV en los aumentos de 25x, 45x, 50x, 80x y 200x, y a 10 kV en 400x (Figura 39). A diferencia de lo observado en configuraciones anteriores, esta muestra presentó una distribución más diversa de tamaños, abarcando partículas pequeñas, medias y algunas relativamente grandes dentro del conjunto, lo cual resulta beneficioso para un empaquetamiento más eficiente. La mayoría de las partículas mantuvo una morfología tipo huevo cuadrado, y si bien se identificaron algunas con colas o bordes filamentosos, estas no representaron una fracción significativa. Esta combinación de variedad granulométrica y morfología favorable, junto con un valor elevado de densidad aparente, indica que el polvo obtenido bajo esta condición presenta un alto potencial para aplicaciones en moldeo rotacional, al facilitar tanto la compactación como la sinterización homogénea del material.

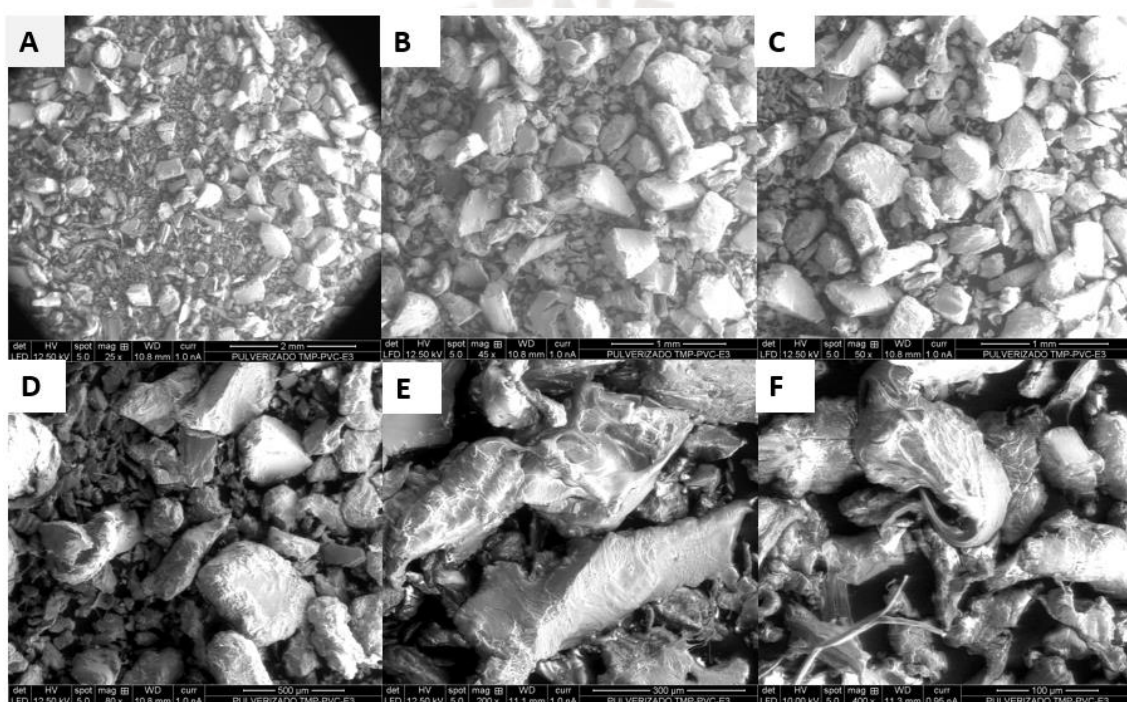


Figura 39. SEM de partículas PVC - tercer espaciamento: A. 25x (12.5kV) B. 45x (12.5kV) C. 50x (12.5kV) D. 80x (12.5kV) E. 200x (12.5kV) F. 400x (10kV)

3.3.4. Ensayo de Granulometría

Se realizó un ensayo de granulometría por tamizado en seco a tres muestras representativas del polvo de PVC, obtenidas bajo condiciones específicas de operación: 1.2-100-100 (espaciamiento máximo), 0.6-100-100 (espaciamiento intermedio) y 0.3-100-100 (espaciamiento mínimo), todas trabajadas con 100 % de RPM y 100 % de velocidad de alimentación. Estas configuraciones fueron seleccionadas debido a que exhibieron, en análisis previos, valores elevados de densidad aparente y morfologías favorables según observaciones SEM, lo que las hacía candidatas idóneas para un análisis detallado de la distribución de tamaño de partícula.

El tamizado mecánico abarcó un rango de fracciones entre partículas gruesas ($>600\ \mu\text{m}$) y finas ($<45\ \mu\text{m}$). En las tres muestras, la mayor proporción del material retenido se concentró entre 425 y $212\ \mu\text{m}$, lo que indica una distribución centrada en tamaños intermedios, acorde con los criterios de calidad establecidos para aplicaciones en moldeo rotacional. Según la literatura, este rango favorece un equilibrio entre fluidez, compactación y sinterización, mientras que fracciones excesivamente finas o gruesas pueden comprometer el desempeño del polvo (Crawford & Trono, 2002; Throne & Sohn, 1989).

Los tamaños promedio de partícula (D_m), calculados mediante el método ponderado, fueron:

- e1: $397.54\ \mu\text{m}$
- e2: $384.67\ \mu\text{m}$
- e3: $328.59\ \mu\text{m}$

En la muestra 1.2-100-100, correspondiente al espaciamiento mayor, se observó una mayor proporción de partículas consideradas “grandes” en el contexto de su propia distribución interna, aunque todas las fracciones analizadas se mantuvieron dentro del rango intermedio global. Esta predominancia, acompañada de una escasa transición hacia tamaños más pequeños, sugiere una distribución poco progresiva, que puede dificultar el empaquetamiento compacto y generar vacíos durante la sinterización. Esta tendencia se confirma en la curva de distribución (Figura 40.A), donde se observa un desplazamiento hacia la derecha, indicando una mayor tendencia hacia la presencia de partículas de mayor tamaño. En el caso de la muestra 0.6-100-100, si bien se evidenció una morfología adecuada, con predominancia de partículas tipo huevo cuadrado, la progresión entre partículas de mayor y menor tamaño no fue del todo uniforme, y se identificó una menor proporción de partículas finas, lo que podría limitar la densificación del lecho particulado y favorecer la formación de porosidades. Esta observación es coherente con la curva mostrada en la Figura 40.B, que también se encuentra desplazada hacia la derecha, reflejando una mayor tendencia hacia partículas grandes y medias, pero con una presencia muy limitada de partículas finas. Finalmente, la muestra 0.3-100-100 presentó una composición más diversa, con presencia simultánea de partículas pequeñas, medias y algunas relativamente grandes (dentro del contexto del conjunto). Esta diversidad, sumada a una alta proporción de partículas con morfología adecuada y a un valor elevado de densidad aparente, sugiere un mejor potencial de empaquetamiento. Aunque se observaron colas y filamentos en ciertas partículas, su proporción fue baja, por lo que no comprometen significativamente la calidad del polvo. En conjunto, esta muestra mostró una distribución granulométrica más continua, que puede favorecer la estabilidad del lecho durante el moldeo y minimizar la

formación de porosidades. Esta conclusión también se respalda en la curva de la Figura 40.C, la cual presenta una forma más simétrica y centrada, indicando una mejor homogeneidad en la distribución de tamaños de partícula.

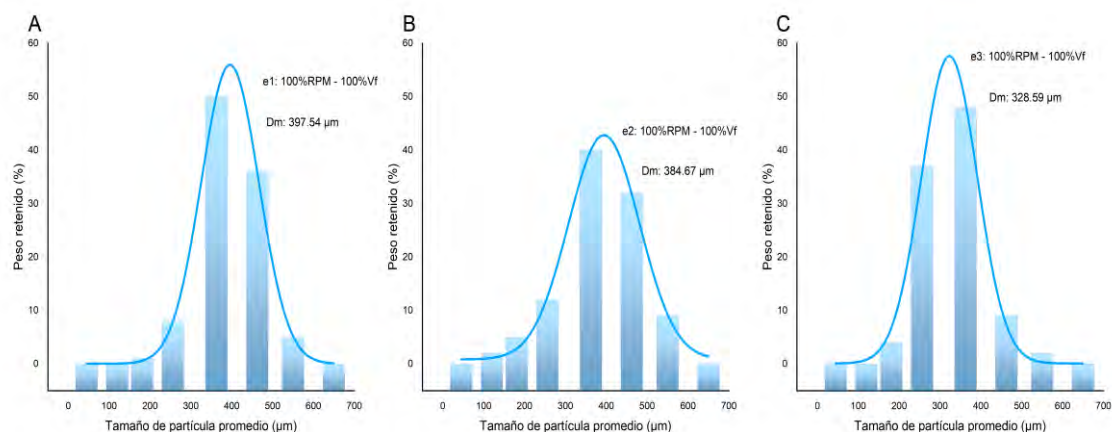


Figura 40. Curva de distribución granulométrica - PVC: A. e1, 100% RPM, 100% Vf. B. e2, 100% RPM, 100% Vf. C. e3, 75% RPM, 75% Vf

3.3.5. Ensayo de Índice de Fluidez

En el análisis del índice de fluidez (IFM), se observó una variación significativa en los valores obtenidos tras el proceso de pulverización, en comparación con el valor del material de partida, cuyo promedio fue de 1.35 g/10 min. Luego de someter al PVC a distintas condiciones de molienda por disco, los valores promedio de IFM (Figura 41) resultaron ser de 6.55 g/10 min para la muestra con espaciamiento máximo (1.2 mm), 3.85 g/10 min para el espaciamiento intermedio (0.6 mm) y 2.07 g/10 min para el espaciamiento mínimo (0.3 mm).

Es evidente que en la primera condición (1.2 mm) el índice de fluidez se ha elevado considerablemente con respecto al valor original, lo cual sugiere que en esta condición el material ha experimentado degradación mecánica significativa. Este fenómeno ha reducido su viscosidad, comprometiendo su integridad estructural y, en consecuencia, sus propiedades mecánicas. El valor alcanzado (6.55 g/10 min) se encuentra muy por encima de lo reportado para un PVC rígido comercial típico, lo que evidencia una pérdida importante en el peso molecular del polímero.

En contraste, la condición de espaciamiento mínimo (0.3 mm) presentó el valor más bajo de índice de fluidez (2.07 g/10 min), lo cual indica que el material ha conservado una mayor viscosidad, reflejo de una menor degradación mecánica por esfuerzos y un peso molecular más elevado. Este resultado, coherente con los demás ensayos realizados, reafirma que la muestra obtenida bajo esta condición es la más idónea, ya que ha mantenido un desempeño favorable en densidad aparente, morfología

de partículas y distribución granulométrica. Si bien no existe una diferencia extremadamente amplia entre los valores de IFM en los espaciamientos de 0.6 y 0.3 mm, la mayor presencia de partículas finas y una distribución más centrada y homogénea en la muestra 0.3 han contribuido a que este valor se mantenga por debajo del resto.

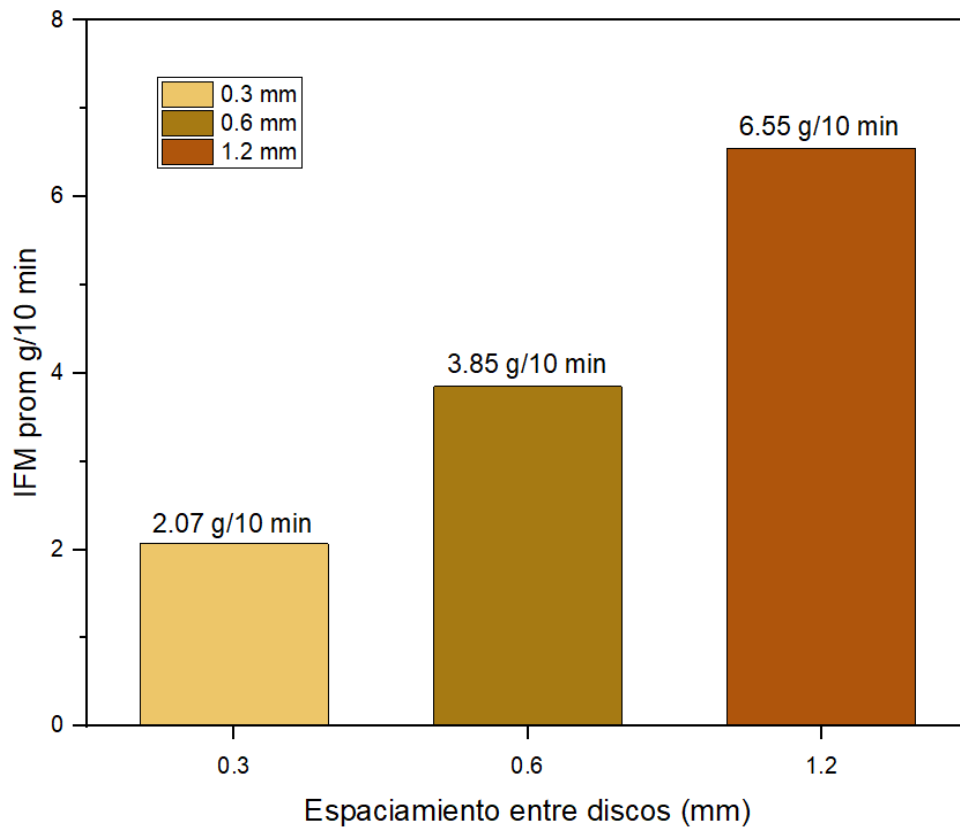


Figura 41. Valores promedio de Índice de Fluidez (g/10 min) - PVC

CONCLUSIONES

El estudio del pulverizado de los plásticos reciclados o recuperados: HDPE, HIPS y PVC rígido, evidenció que la eficiencia del proceso está directamente condicionada por la interacción entre el espaciamiento entre discos, la velocidad de alimentación y las RPM del motor, ya que estos parámetros determinan el tiempo de permanencia del material en la cámara de corte y, por ende, la energía mecánica efectiva aplicada. Las condiciones de pulverizado que generan polvos con características óptimas para ser utilizados en el proceso de moldeo rotacional, son: **HDPE**: mínimo espaciamiento (0.3 mm), 100 % RPM y 100 % Vf; **HIPS**: espaciamiento medio (0.6 mm), 100 % RPM y 100 % Vf; y **PVC rígido**: mínimo espaciamiento (0.3 mm), 100 % RPM y 100 % Vf.

En el **HDPE**, el menor porcentaje de pérdida se registró con espaciamiento mínimo (0.3 mm), 100% de RPM y 75% de alimentación (38.25% de pérdida), lo que indica que la reducción del espaciamiento incrementa la fricción y el contacto, mejorando la fragmentación sin exceder el calentamiento. En **HIPS**, la configuración más eficiente fue 0.3 mm, 100% de RPM y 75% de alimentación, alcanzando un 79.47% de aprovechamiento, lo que confirma que una alimentación controlada prolonga el tiempo de corte y evita el paso de partículas sin procesar. En **PVC rígido**, el espaciamiento intermedio (0.6 mm) a 100% de RPM y 100% de alimentación presentó la mayor eficiencia global (90.4% de aprovechamiento), debido a que permitió un flujo constante con alta energía de corte, sin atascos ni sobrecalentamiento.

Se determinó que una **velocidad de alimentación** excesiva a bajas RPM reduce drásticamente la eficiencia, como se observó en PVC (87% de pérdida a 50% de RPM y 100% de alimentación), debido a que el material atraviesa la cámara sin recibir la acción mecánica necesaria. Por el contrario, velocidades moderadas favorecen una mayor permanencia del material en la zona activa, mejorando la reducción de tamaño, como ocurrió con HIPS y HDPE.

En el caso del **HDPE**, la **mayor densidad aparente** (0.255 g/cm³, con una coordinación de empaque de 0.267) se alcanzó con un espaciamiento mínimo entre discos de corte (0.3 mm) y condiciones de 100 % RPM y 100 % Vf. Para el **HIPS**, el valor más alto (0.55 g/cm³, coordinación de empaque 0.547) se obtuvo con un espaciamiento medio (0.6 mm) bajo condiciones de 100 % RPM y 100 % Vf. Finalmente, el **PVC rígido** presentó su mayor densidad aparente (0.37 g/cm³, coordinación de empaque 0.266) con espaciamiento mínimo a 0.3 mm entre discos de corte y 100 % de RPM y 100% Vf. Estos resultados reflejan la eficiencia con la que las partículas de polvo se empaquetan, lo que permite identificar las condiciones que minimizan la porosidad.

Los análisis SEM confirmaron los resultados de la mayor densidad aparente, revelando diferencias morfológicas asociadas al empaquetamiento. En el **HDPE**, la baja coordinación de empaque (0.267) respecto al valor teórico para una morfología tipo “huevo cuadrado” (0.534) se evidenció por la presencia de partículas con colas y fibras superficiales. En contraste, el **HIPS** mostró partículas más limpias y sin colas, coherente con su coordinación de empaque superior al valor teórico ($0.547 > 0.534$). El **PVC rígido** presentó principalmente partículas con morfología de “huevo cuadrado”, aunque acompañadas de colas y fibras, lo que concuerda con su valor de coordinación de empaquetamiento ($0.266 < 0.534$).

Los ensayos de granulometría indicaron que la distribución de tamaño de partícula se ubicó en el rango típico de malla 200 (75 μm) a malla 35 (500 μm), correspondiente a polvos de grado adecuado para moldeo rotacional, con una distribución de tipo gaussiano característica del proceso de pulverización. El tamaño promedio fue de 298.435 μm para el **HDPE**, 332.48 μm para el **HIPS** y 328.59 μm para el **PVC rígido**.

Se observó una estrecha relación entre la fluidez, la densidad aparente, la morfología y el tamaño promedio de partícula. Las condiciones que produjeron los valores más altos de densidad aparente también mostraron los índices de fluidez más bajos, lo que indica mayor viscosidad y, por ende, mayor peso molecular. Este comportamiento se asocia con una mejor resistencia al impacto y mayor tenacidad, ya que durante el sinterizado las cadenas moleculares largas se entrelazan más, permitiendo que el material absorba y redistribuya la energía del impacto sin fracturarse. Las muestras de HDPE obtenidas con mínimo espaciamiento (0.3 mm), 100 % RPM y 100 % Vf, registraron un índice de fluidez de 1.50 g/10 min. Las muestras de HIPS pulverizadas con espaciamiento medio (0.6 mm), 100 % RPM y 100 % Vf, mostraron un índice de fluidez de 5.62 g/10 min. Finalmente, las muestras de PVC rígido procesadas con mínimo espaciamiento (0.3 mm), 100 % RPM y 100 % Vf, obtuvieron un índice de fluidez de 2.07 g/10 min.

BIBLIOGRAFÍA

AIMPLAS. (2022). Reciclado químico en España: Apostando por un futuro circular. *Plastics Europe*. Disponible en: https://plasticseurope.org/es/wp-content/uploads/sites/4/2022/05/Reciclado-Quimico-en-Espana_Apostando-por-un-Futuro-Circular-2.pdf

Aldousiri, B., Shalwan, A., & Chin, C. W. (2013). A review on tribological behaviour of polymeric composites and future reinforcements. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013, Article ID 645923. DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/645923>

Acosta, J. (2012). Desarrollo de un proceso económico de moldeo para la fabricación de piezas y partes de muebles ergonómicos a partir del Qauchu Kullu: material compuesto de plástico reforzado con residuos recuperados de madera (Convenio n°134 - FINCYT - FIDECOM - PIPEA - 2012).

American Society for Testing and Materials. (2017). ASTM D1895–17: Standard test methods for apparent density, bulk factor, and pourability of plastic materials. Disponible en: <https://www.astm.org/d1895-17.html>

American Society for Testing and Materials. (2018). ASTM D1921–18: Standard test methods for particle size (sieve analysis) of plastic materials. Disponible en: <https://www.astm.org/d1921-18.html>

Arribasplata-Seguin, A. S. (2021). Estudio del sinterizado de materiales compuestos de polietileno reciclado y madera capirona recuperada fabricados mediante moldeo rotacional (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Ingeniería.

Arribasplata-Seguin, A., Quispe-Dominguez, R., Tupia-Anticona, W., & Acosta-Sullcahuamán, J. (2021). Rotational molding parameters of wood–plastic composite materials made of recycled high-density polyethylene and wood particles. *Composites Part B: Engineering*, 223, 108876. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108876>

Barbas, A. (2023). El reciclaje de PVC: Un paso hacia la sostenibilidad. AIMPLAS. Disponible en: <https://www.aimplas.es/blog/el-reciclaje-de-pvc-un-paso-hacia-la-sostenibilidad>

Barczewski, M., Hejna, A., Anisko, J., Andrzejewski, J., Piasecki, A., Mysiukiewicz, O., Bak, M., Gapinski, B., & Ortega, Z. (2021). Rotational molding of polylactide (PLA) composites filled with copper slag as a waste filler from metallurgical industry. *Polymer Testing*, 96, 107074. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107074>

Barrios, M. (2024). ¿Qué es el reciclaje mecánico y químico de plásticos? *GTA Ambiental*. Disponible en: <https://gtaambiental.com/reciclaje-mecanico-y-quimico/>

Bioplásticos. (2014). Vasos de yogurt fabricados con bioplásticos Ingeo. *Plástico*. Disponible en: <https://www.plastico.com/es/noticias/vasos-de-yogurt-fabricados-con-bioplasticos-ingeo>

Castaño, R. (2024). La verdadera historia del reciclaje: La industria petroquímica y la verdad sobre los plásticos. *Coverpan*. Disponible en: <https://www.coverpan.es/blog/la-verdad-sobre-los-plasticos-reciclad/>

Crawford, R. J., & Throne, J. L. (2002). *Rotational molding technology*. William Andrew Publishing.

Dassault Systèmes. (2022). *Compression molding – Guía de procesos*. 3DS. Disponible en: <https://www.3ds.com/es/make/guide/process/compression-molding/>

Ecoplas. (2011). *Manual de valorización de los residuos plásticos*. Buenos Aires. Disponible en: <https://ecoplas.org.ar/pdf/11.pdf>

Ecoplas. (2017). *Reciclado de plásticos*. Disponible en: <https://ecoplas.org.ar/2016/reciclado-de-plasticos-3/>

Flizikowski, J., Al-Zubiedy, A., & Alobad, Z. K. (2019). Testing and analysing the grinding uniformity of polymer products. *Journal of Mechanical Engineering Research & Developments*, pp 87–90.

Front Materials. (2024). ¿Can PVC be recycled? Disponible en: <https://www.front-materials.com/news/can-pvc-be-recycled/>

Giakoumakis, N. S., Vos, C., Janssens, K., Vekeman, J., Denayer, M., De Proft, F., Marquez, C., & De Vos, D. (2023). Total revalorization of high impact polystyrene (HIPS): Enhancing styrene recovery and upcycling of the rubber phase. *Green Chemistry*, 25(9), 3876–3891. DOI: <https://doi.org/10.1039/D3GC00422E>

Global Growth Insights. (2024). High-density polyethylene market. Disponible en: <https://www.globalgrowthinsights.com/es/market-reports/high-density-polyethylene-market-111493>

GonPlastics. (2024). Exploring high impact polystyrene: Versatile applications and innovative advancements. Disponible en: <https://www.gonplastics.com/es/a-exploring-high-impact-polystyrene-versatile-applications-and-innovative-advancements.html>

Greco, A., & Maffezzoli, A. (2004). Powder-shape analysis and sintering behavior of high-density polyethylene powders for rotational molding. *Journal of Applied Polymer Science*, pp 449–460.

Greene, J. P. (2021). Microstructures of polymers. *Automotive Plastics and Composites* (pp. 27–37). William Andrew Publishing. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818008-2.00009-X>

Gupta, N., Ramkumar, P. L., & Abhishek, K. (2020). Material selection for rotational molding process utilizing distinguished multi criteria decision making techniques. *Materials Today: Proceedings*, 28, pp 1770–1775. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.960>

Hermida, E (2011). *Polímeros* (pp. 5–70). Ministerio de Educación & Instituto Nacional de Educación Tecnológica. Buenos Aires. Disponible en: https://www.inet.edu.ar/wp-content/uploads/2012/11/09_Polimeros.pdf

International Organization for Standardization. (2008). ISO 15270:2008. Plásticos - Directrices para la recuperación y reciclado de residuos plásticos. Disponible en: <https://www.iso.org/standard/40936.html>

Klumex. (2023). Termoplásticos: ventajas. Disponible en: <https://klumex.com/blog/termoplasticos-ventajas/>

Market Growth Reports. (2024). High Impact Polystyrene (HIPS) Market Overview. Disponible en: <https://www.marketgrowthreports.com/>

Massonnet, G., & Muehlethaler, C. (2023). Forensic paint analysis, *Encyclopedia of Forensic Sciences* (3.^a ed., pp. 646–659). Elsevier. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823677-2.00044-1>

McDaid, J. (1998). The grinding of polyethylene powders for use in rotational moulding (Tesis de maestría). Queen's University Belfast, Reino Unido.

McKeen, L. (2012). Introducción a las propiedades físicas, mecánicas y térmicas de plásticos y elastómeros. En el efecto de la esterilización en plásticos y elastómeros (3.^a ed., pp. 57–84). Elsevier. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-1-4557-2598-4.00003-4>

Meseguer, J., Portoles, A., & Martínez, E. (2020). Revisión de los principales tipos de elastómeros y ensayos normalizados. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 75–95. Disponible en: <https://reviberpol.org/wp-content/uploads/2020/04/2020-21-2-75-95-meseguer.pdf>

Mirowski, J., Oliwa, R., Oleksy, M., Rój, E., Tomaszewska, J., Mizera, K., & Ryszkowska, J. (2021). Composites of poly(vinyl chloride) with residual hops after supercritical extraction in CO₂. *Polymers*, 13(2736). DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13162736>

MINAM. (2024). Educación ambiental – Problemática. Ministerio del Ambiente del Perú. Disponible en: <https://www.gob.pe/58443-problematica>

Myers. (2020). PLÁSTICO CRISTALEX CAL. 10 DE 1.40mt (APROX. 2.16 METROS POR KILO). Disponible en: <https://casamyers.com.mx/item/30200070>

Niaounakis, M. (2015). Chapter 2 – Properties. *Biopolymers: Processing and Products* (pp. 79–116). William Andrew Publishing. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-26698-7.00002-7>

Ortiz, J. (2003). *Procesos Industriales - Rotomoldeo - para Diseñadores Industriales*. UNAM. Disponible en: https://cidi-unam.com.mx/cidi_nw/archivos_externos/Publicaciones/PI%203%20Rotomoldeo.pdf

Palamatic Process. (2024). Todo sobre los polvos en la industria. Disponible en: <https://www.palamaticprocess.es/blog/industria-quimica/plasticos-compuestos>

PALLMANN. (2018). Pulverización de plásticos [Catálogo PDF]. Disponible en: https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/217134/PLASTICO---Pulverizacion-de-plasticos,-ES.pdf

PLAREMESA. (s.f.). Termoplásticos, termoestables y la fibra de vidrio. Disponible en: <https://www.plaremesa.net/termoplasticos/>

ReduCe Reutiliza Recicla. (s.f.). Materiales termoestables. Disponible en: <https://reducereutilizarecicla.org/materiales-termoestables/>

REJIGLASS. (2022). Polímeros ¿Qué son y para qué sirven? Disponible en: <https://rejiglass.com.mx/polimeros/>

Retsch GmbH. (2024). [Manual, catálogo o guía técnica sobre tamizado o pulverización]. Disponible en: <https://www.retsch.com>

Schmidt, J., Plata, M., Tröger, S., & Peukert, W. (2012). Production of polymer particles below 5 μm by wet grinding. Powder Technology. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.04.064>

Schott, J. (2011). Análisis sobre la nueva generación de formulaciones en la manufactura de productos plásticos producidos por rotomoldeo. Centro de Investigación en Química Aplicada.

Sintac. (2019). ¿Qué son los termoplásticos? Disponible en: <https://sintac.es/que-son-los-termoplasticos/>

Taner, Y., Sahin, T., & Sinmazcelik, T. (2009). Fracture characteristics of high impact polystyrene under impact fatigue loadings. Journal of Materials Science, 4308–4314. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-009-3640-3>

Throne, J. L., & Sohn, M. (1989). Characterization of rotational molding grade polyethylene powders. Department of Polymer Engineering, University of Akron.

Torres, A. H. U., d'Almeida, J. R. M., & Habas, J.-P. (2011). Aging of HDPE pipes exposed to diesel lubricant. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 1594–1599. DOI: <https://doi.org/10.1080/03602559.2011.578297>

Torres, F. G. (1999). Polímeros: Procesos de manufactura y diseño. Parte 1: Termoplásticos. *Revista de Química*, pp 55-67.

Vashchuk, A., Fainleib, A. M., Starostenko, O., & Grande, D. (2018). Application of ionic liquids in thermosetting polymers: Epoxy and cyanate ester resins. *Express Polymer Letters*, 898–917. DOI: <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2018.77>

Varón, D., Balart, R., Ferrándiz, S., & García, D. (2012). Estudio, análisis y clasificación de elastómeros termoplásticos, pp 5–14. Disponible en: <https://3ciencias.com/wp-content/uploads/2012/08/2.clasificacion-elastomeros.pdf>

Vásquez, A., Espinosa, R., Beltrán, M., & Velasco, M. (2014). El reciclaje de los plásticos. Universidad Autónoma Metropolitana. Ciudad de México.

Vilcayauri Rios, A. A. (s.f.). Estado de la tecnología del proceso de moldeo rotacional de polímeros reforzados con fibras naturales (Tesis de bachiller). Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.

Wanrooe HIGHTECH. (2019). Plastic Film PP Woven Bag Crusher Granulator Machine [Imagen]. Disponible en: <https://www.wanrooe.com/plastic-film-pp-woven-bag-recycling-crusher-granulator-machine/>

Wanrooe Machinery Co., LTD. (2024). PNMF Series Pulverizer: Instruction and Operation Manual [PDF]. Disponible en: www.wanrooe.com

WEDO MACHINERY. (s.f.). Molienda de pulverización de plástico. Disponible en: <https://www.wedomachine.com/es/product/plastic-pulverizing-grinding-waste-pvc-upvc-variety-material-plastic-pulverizer-machine/>

Yang, R., Xu, G., Tao, W., Wang, Q., & Tang, Y. (2024). Recycled polymer: Green roads for polyester plastics. *Green Carbon*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.greenca.2024.01.004>

ANEXO

ANEXO 1. RESULTADOS DEL ENSAYO DE PULVERIZADO

HDPE (Polietileno de Alta Densidad)

Tabla 4. Pulverizado de material HDPE con espaciamento máximo

Espaciamento máximo entre discos de corte: 1.2 mm					
RPM motor	Vel. Alimentación	T max	Mat. Inicial (g)	Mat. Pulverizado (g)	Pérdida (%)
50%	75%	27 °C	3000	859.5	71.35%
	100%	28 °C	3000	692	76.93%
75%	75%	27 °C	3000	1216	59.47%
	100%	30 °C	3000	1192.5	60.25%
100%	75%	29 °C	3000	1638.5	45.38%
	100%	29 °C	3000	1535	48.83%

Tabla 5. Pulverizado de material HDPE con espaciamento intermedio

Espaciamento intermedio entre discos de corte: 0.6 mm					
RPM motor	Vel. Alimentación	T max	Mat. Inicial (g)	Mat. Pulverizado (g)	Pérdida (%)
50%	75%	30 °C	3000	936.5	68.78%
	100%	33 °C	3000	938.5	68.72%
75%	75%	31 °C	3000	1441.5	51.95%
	100%	33 °C	3000	1451	51.63%
100%	75%	30 °C	3000	1479	50.70%
	100%	30 °C	3000	1754	41.53%

Tabla 6 Pulverizado del material HDPE con espaciamento mínimo.

Espaciamento mínimo entre discos de corte: 0.3 mm					
RPM motor	Vel. Alimentación	T max	Mat. Inicial (g)	Mat. Pulverizado (g)	Pérdida (%)
50%	75%	29 °C	3000	918	69.40%
	100%	30 °C	3000	626.5	79.12%
75%	75%	29 °C	3000	1335.5	55.48%
	100%	31 °C	3000	1177.5	60.75%
100%	75%	29 °C	3000	1852.5	38.25%
	100%	29 °C	3000	1604.5	46.52%

HIPS (Poliestireno de Alto impacto)

Tabla 7. Pulverizado de material HIPS con espaciamiento máximo

Espaciamiento máximo entre discos de corte: 1.2 mm					
RPM motor	Vel. Alimentación	T max	Mat. Inicial (g)	Mat. Pulverizado (g)	Pérdida (%)
50%	75%	24 °C	3000	1362	54.6%
	100%	25 °C	3000	1296.75	56.775%
75%	75%	24 °C	3000	1726.5	42.45%
	100%	25 °C	3000	1426.5	52.45%
100%	75%	27 °C	3000	2178.75	27.375%
	100%	29 °C	3000	1255.5	41.85%

Tabla 8. Pulverizado de material HIPS con espaciamiento intermedio

Espaciamiento intermedio entre discos de corte: 0.6 mm					
RPM motor	Vel. Alimentación	T max	Mat. Inicial (g)	Mat. Pulverizado (g)	Pérdida (%)
50%	75%	25 °C	3000	1184.25	60.525%
	100%	26 °C	3000	1193.25	60.225%
75%	75%	25 °C	3000	1856.25	38.125%
	100%	28 °C	3000	1948.5	35.05%
100%	75%	28 °C	3000	2361.75	21.275%
	100%	30 °C	3000	1725.75	42.475%

Tabla 9 Pulverizado del material HIPS con espaciamiento mínimo.

Espaciamiento mínimo entre discos de corte: 0.3 mm					
RPM motor	Vel. Alimentación	T max	Mat. Inicial (g)	Mat. Pulverizado (g)	Pérdida (%)
50%	75%	29 °C	3000	1309.5	56.35%
	100%	30 °C	3000	1209	59.7%
75%	75%	30 °C	3000	1574.25	47.525%
	100%	32 °C	3000	877.959184	70.734%
100%	75%	32 °C	3000	2384.1	20.53%
	100%	31 °C	3000	1971	34.3%

PVC rígido

Tabla 10. Pulverizado de material PVC rígido con espaciamiento máximo

Espaciamiento máximo entre discos de corte: 1.2 mm					
RPM motor	Vel. Alimentación	T max	Mat. Inicial (g)	Mat. Pulverizado (g)	Pérdida (%)
50%	75%	24 °C	3000	415.5	86.15%
	100%	24 °C	3000	390	87%
75%	75%	26 °C	3000	1296.75	56.775%
	100%	24 °C	3000	1254.75	58.175%
100%	75%	27 °C	3000	2565.75	14.475%
	100%	24 °C	3000	2011.5	32.95%

Tabla 11. Pulverizado de material PVC rígido con espaciamiento intermedio

Espaciamiento intermedio entre discos de corte: 0.6 mm					
RPM motor	Vel. Alimentación	T max	Mat. Inicial (g)	Mat. Pulverizado (g)	Pérdida (%)
50%	75%	24 °C	3000	713.25	76.225%
	100%	25 °C	3000	429.75	85.675%
75%	75%	27 °C	3000	1398	53.4%
	100%	28 °C	3000	1158	61.4%
100%	75%	22 °C	3000	1389.75	53.675%
	100%	22 °C	3000	2712	9.6%

Tabla 12. Pulverizado del material PVC rígido con espaciamiento mínimo.

Espaciamiento mínimo entre discos de corte: 0.3 mm					
RPM motor	Vel. Alimentación	T max	Mat. Inicial (g)	Mat. Pulverizado (g)	Pérdida (%)
50%	75%	23 °C	3000	765.75	74.475%
	100%	25 °C	3000	459	84.7%
75%	75%	25 °C	3000	287.25	90.425%
	100%	25 °C	3000	1147.5	61.75%
100%	75%	27 °C	3000	2466	17.8%
	100%	28 °C	3000	1820.25	39.325%

ANEXO 2. CÁLCULO DE DENSIDAD APARENTE

HDPE (Polietileno de alta densidad)

Tabla 13. Valores de Densidad Aparente por condición de operación -HDPE

Densidad Aparente - HDPE						
Nº	Espaciamento (mm)	RPM Motor (%)	Alimentación (%)	Recipiente vacío (g)	Recipiente lleno (g)	Densidad Aparente (g/ml3)
1	1.2	100	100	435.5	459	0.245
2			75	435.5	458	0.235
3		75	100	435.5	456	0.215
4			75	435.5	456.5	0.22
5		50	100	435.5	453	0.185
6			75	435.5	452	0.175
1	0.6	100	100	435.5	459.5	0.25
2			75	435.5	458	0.235
3		75	100	435.5	459	0.245
4			75	435.5	458	0.235
5		50	100	435.5	455	0.205
6			75	435.5	453.5	0.19
1	0.3	100	100	435.5	460	0.255
2			75	435.5	459.5	0.25
3		75	100	435.5	459.5	0.25
4			75	435.5	457	0.225
5		50	100	435.5	455	0.205
6			75	435.5	454	0.195

HIPS (Poliestireno de Alto Impacto)

Tabla 14. Valores de Densidad Aparente por condición de operación -HIPS

Densidad Aparente - HIPS						
Nº	Espaciamento (mm)	RPM Motor (%)	Alimentación (%)	Recipiente vacío (g)	Recipiente lleno (g)	Densidad Aparente (g/ml3)
1	1.1	100	100	434.5	484.5	0.5
2			75	434.5	484	0.495
3		75	100	434.5	483.5	0.49
4			75	434.5	484	0.495
5		50	100	434.5	476.5	0.42
6			75	434.5	470.5	0.36
1	0.6	100	100	434.5	489.5	0.55
2			75	434.5	488.5	0.54

3			100	434.5	482	0.475
4		75	75	434.5	484.5	0.5
5			100	434.5	478.5	0.44
6		50	75	434.5	476.5	0.42
1			100	434.5	485	0.505
2		100	75	434.5	485	0.505
3	0.3		100	434.5	482	0.475
4		75	75	434.5	486	0.515
5			100	434.5	478	0.435
6		50	75	434.5	478.5	0.44

PVC rígido

Tabla 15. Valores de Densidad Aparente por condición de operación - PVC

Densidad Aparente – PVC rígido						
Nº	Espaciamento (mm)	RPM Motor (%)	Alimentación (%)	Recipiente vacío (g)	Recipiente lleno (g)	Densidad Aparente (g/ml ³)
1	1.1	100	100	434.5	467	0.325
2			75	434.5	466	0.315
3		75	100	434.5	464.5	0.3
4			75	434.5	464	0.295
5		50	100	434.5	461.5	0.27
6			75	434.5	463	0.285
1	0.6	100	100	434.5	469	0.345
2			75	434.5	468.5	0.34
3		75	100	434.5	464	0.295
4			75	434.5	465	0.305
5		50	100	434.5	463	0.285
6			75	434.5	462.5	0.28
1	0.3	100	100	434.5	471.5	0.37
2			75	434.5	467.5	0.33
3		75	100	434.5	463	0.285
4			75	434.5	462	0.275
5		50	100	434.5	463	0.285
6			75	434.5	462.5	0.28

ANEXO 3. ENSAYO DE GRANULOMETRÍA

HDPE (Polietileno de alta densidad)

Tabla 16. Porcentaje de material HDPE acumulado & Dm - 1.2 mm, 100% RPM, 100% Vf

Granulometría HDPE. e1: 1.2 mm, 100 % RPM, 100 % Alimentación						
Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	293.5	0.5	1	1	307.425
600-500	550	276	0.5	1	2	
500-425	462.5	279	4	8	10	
425-300	362.5	278.5	21.5	43	53	
300-212	256	264	15	30	83	
212-150	181	245.5	5	10	93	
150-90	120	242	3	6	99	
<90	45	428.5	0.5	1	100	

Tabla 17. Porcentaje de material HDPE acumulado & Dm - 1.2 mm, 100% RPM, 75% Vf

Granulometría HDPE. e1: 1.2 mm, 100 % RPM, 75 % Alimentación						
Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	293.5	0.5	1	1	304.43
600-500	550	276	0.5	1	2	
500-425	462.5	278.5	3.5	7	9	
425-300	362.5	277.5	20.5	41	50	
300-212	256	265.5	16.5	33	83	
212-150	181	245.5	5	10	93	
150-90	120	242.5	3.5	7	100	
<90	45	428.5	0.5	1	101	

Tabla 18. Porcentaje de material HDPE acumulado & Dm - 1.2 mm, 75% RPM, 100% Vf

Granulometría HDPE. e1: 1.2 mm, 75 % RPM, 100 % Alimentación						
Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	293.5	0.5	1	1	306.415
600-500	550	276	0.5	1	2	
500-425	462.5	277.5	2.5	5	7	
425-300	362.5	281	24	48	55	
300-212	256	262.5	13.5	27	82	

212-150	181	246.5	6	12	94
150-90	120	241.5	2.5	5	99
<90	45	428.5	0.5	1	100

Tabla 19. Porcentaje de material HDPE acumulado & Dm - 1.2 mm, 75% RPM, 75% Vf

Granulometría HDPE. e1: 1.2 mm, 75 % RPM, 75 % Alimentación

Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	293.5	0.5	1	1	311.815
600-500	550	276	0.5	1	2	
500-425	462.5	278	3	6	8	
425-300	362.5	282.5	25.5	51	59	
300-212	256	261	12	24	83	
212-150	181	245.5	5	10	93	
150-90	120	242	3	6	99	
<90	45	428.5	0.5	1	100	

Tabla 20. Porcentaje de material HDPE acumulado & Dm - 1.2 mm, 50% RPM, 100% Vf

Granulometría HDPE. e1: 1.2 mm, 50 % RPM, 100 % Alimentación

Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	293.5	0.5	1	1	291.29
600-500	550	276	0.5	1	2	
500-425	462.5	277.5	2.5	5	7	
425-300	362.5	278.5	21.5	43	50	
300-212	256	261	12	24	74	
212-150	181	248	7.5	15	89	
150-90	120	243.5	4.5	9	98	
<90	45	429	1	2	100	

Tabla 21. Porcentaje de material HDPE acumulado & Dm - 1.2 mm, 50% RPM, 75% Vf

Granulometría HDPE. e1: 1.2 mm, 50 % RPM, 75 % Alimentación

Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	293.5	0.5	1	1	286.03
600-500	550	276	0.5	1	2	
500-425	462.5	277	2	4	6	
425-300	362.5	277	20	40	46	
300-212	256	263	14	28	74	

212-150	181	248	7.5	15	89
150-90	120	243.5	4.5	9	98
<90	45	429	1	2	100

Tabla 22. Porcentaje de material HDPE acumulado & Dm - 0.6 mm, 100% RPM, 100% Vf

Granulometría HDPE. e2: 0.6 mm, 100 % RPM, 100 % Alimentación

Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	293.5	0.5	1	1	295.985
600-500	550	276	0.5	1	2	
500-425	462.5	277.5	2.5	5	7	
425-300	362.5	280	23	46	53	
300-212	256	261	12	24	77	
212-150	181	246.5	6	12	89	
150-90	120	243	4	8	97	
<90	45	429.5	1.5	3	100	

Tabla 23. Porcentaje de material HDPE acumulado & Dm - 0.6 mm, 100% RPM, 75% Vf

Granulometría HDPE. e2: 0.6 mm, 100 % RPM, 75 % Alimentación

Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	293.5	0.5	1	1	304.38
600-500	550	276	0.5	1	2	
500-425	462.5	278	3	6	8	
425-300	362.5	280	23	46	54	
300-212	256	262.5	13.5	27	81	
212-150	181	246	5.5	11	92	
150-90	120	242.5	3.5	7	99	
<90	45	428.5	0.5	1	100	

Tabla 24. Porcentaje de material HDPE acumulado & Dm - 0.6 mm, 75% RPM, 100% Vf

Granulometría HDPE. e2: 0.6 mm, 75 % RPM, 100 % Alimentación

Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	293.5	0.5	1	1	316.555
600-500	550	276	0.5	1	2	
500-425	462.5	279	4	8	10	
425-300	362.5	282.5	25.5	51	61	

300-212	256	260	11	22	83
212-150	181	246	5.5	11	94
150-90	120	241.5	2.5	5	99
<90	45	428.5	0.5	1	100

Tabla 25. Porcentaje de material HDPE acumulado & Dm - 0.6 mm, 75% RPM, 75% Vf

Granulometría HDPE. e2: 0.6 mm, 75 % RPM, 75 % Alimentación

Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	293.5	0.5	1	1	322.5
600-500	550	276	0.5	1	2	
500-425	462.5	280	5	10	12	
425-300	362.5	283	26	52	64	
300-212	256	259	10	20	84	
212-150	181	245.5	5	10	94	
150-90	120	241.5	2.5	5	99	
<90	45	428.5	0.5	1	100	

Tabla 26. Porcentaje de material HDPE acumulado & Dm - 0.6 mm, 50% RPM, 100% Vf

Granulometría HDPE. e2: 0.6 mm, 50 % RPM, 100 % Alimentación

Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	293.5	0.5	1	1	279.45
600-500	550	276	0.5	1	2	
500-425	462.5	276.5	1.5	3	5	
425-300	362.5	277.5	20.5	41	46	
300-212	256	261	12	24	70	
212-150	181	248.5	8	16	86	
150-90	120	244.5	5.5	11	97	
<90	45	429.5	1.5	3	100	

Tabla 27. Porcentaje de material HDPE acumulado & Dm - 1.2 mm, 50% RPM, 75% Vf

Granulometría HDPE. e2: 0.6 mm, 50 % RPM, 75 % Alimentación

Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	293.5	0.5	1	1	299
600-500	550	276	0.5	1	2	
500-425	462.5	277.5	2.5	5	7	
425-300	362.5	279.5	22.5	45	52	

300-212	256	262	13	26	78
212-150	181	247.5	7	14	92
150-90	120	242.5	3.5	7	99
<90	45	428.5	0.5	1	100

Tabla 28. Porcentaje de material HDPE acumulado & Dm - 0.3 mm, 100% RPM, 100% Vf

Granulometría HDPE. e3: 0.3 mm, 100 % RPM, 100 % Alimentación

Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	293.5	0.5	1	1	298.435
600-500	550	276	0.5	1	2	
500-425	462.5	277	2	4	6	
425-300	362.5	279.5	22.5	45	51	
300-212	256	263.5	14.5	29	80	
212-150	181	246.5	6	12	92	
150-90	120	242.5	3.5	7	99	
<90	45	428.5	0.5	1	100	

Tabla 29. Porcentaje de material HDPE acumulado & Dm - 0.3 mm, 100% RPM, 75% Vf

Granulometría HDPE. e3: 0.3 mm, 100 % RPM, 75 % Alimentación

Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	293.5	0.5	1	1	309.545
600-500	550	276	0.5	1	2	
500-425	462.5	278	3	6	8	
425-300	362.5	281.5	24.5	49	57	
300-212	256	261.5	12.5	25	82	
212-150	181	246.5	6	12	94	
150-90	120	241.5	2.5	5	99	
<90	45	428.5	0.5	1	100	

Tabla 30. Porcentaje de material HDPE acumulado & Dm - 0.3 mm, 75% RPM, 100% Vf

Granulometría HDPE. e3: 0.3 mm, 75 % RPM, 100 % Alimentación

Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	293.5	0.5	1	1	282.08
600-500	550	275.5	0.5	1	2	
500-425	462.5	275.5	0.5	1	3	
425-300	362.5	276.5	19.5	39	42	

300-212	256	266	17	34	76
212-150	181	247.5	7	14	90
150-90	120	243.5	4.5	9	99
<90	45	429	1	2	101

Tabla 31. Porcentaje de material HDPE acumulado & Dm - 0.3 mm, 75% RPM, 75% Vf

Granulometría HDPE. 0.3 mm, 75 % RPM, 75 % Alimentación

Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	293.5	0.5	1	1	302.99
600-500	550	276	0.5	1	2	
500-425	462.5	277	2	4	6	
425-300	362.5	281	24	48	54	
300-212	256	262.5	13.5	27	81	
212-150	181	246.5	6	12	93	
150-90	120	242	3	6	99	
<90	45	428.5	0.5	1	100	

Tabla 32. Porcentaje de material HDPE acumulado & Dm - 0.3 mm, 50% RPM, 100% Vf

Granulometría HDPE. e3: 0.3 mm, 50 % RPM, 100 % Alimentación

Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	293.5	0.5	1	1	267.255
600-500	550	276	0.5	1	2	
500-425	462.5	275.5	0.5	1	3	
425-300	362.5	274	17	34	37	
300-212	256	265	16	32	69	
212-150	181	248.5	8	16	85	
150-90	120	245.5	6.5	13	98	
<90	45	429	1	2	100	

Tabla 33. Porcentaje de material HDPE acumulado & Dm - 0.3 mm, 50% RPM, 75% Vf

Granulometría HDPE. 0.3 mm, 50 % RPM, 75 % Alimentación

Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	293.5	0.5	1	1	295.235
600-500	550	276	0.5	1	2	

500-425	462.5	277.5	2.5	5	7
425-300	362.5	280	23	46	53
300-212	256	260.5	11.5	23	76
212-150	181	247	6.5	13	89
150-90	120	243	4	8	97
<90	45	429.5	1.5	3	100

HIPS (Poliestireno de alto impacto)

Tabla 34. Porcentaje de material HIPS acumulado & Dm - 1.2 mm, 100% RPM, 100% Vf

Granulometría HIPS. e1: 1.2 mm, 100 % RPM, 100 % Alimentación						
Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	293	0	0	0	276.93
600-500	550	277	1.5	3	3	
500-425	462.5	282	7	14	17	
425-300	362.5	268	11	22	39	
300-212	256	262	13	26	65	
212-150	181	249	8.5	17	82	
150-90	120	246	7	14	96	
<90	45	430	2	4	100	

Tabla 35. Porcentaje de material HIPS acumulado & Dm - 1.2 mm, 100% RPM, 75% Vf

Granulometría HIPS. e1: 1.2 mm, 100 % RPM, 75 % Alimentación						
Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	293	0	0	0	276.025
600-500	550	276.5	1	2	2	
500-425	462.5	280	5	10	12	
425-300	362.5	270.5	13.5	27	39	
300-212	256	264	15	30	69	
212-150	181	248	7.5	15	84	
150-90	120	245.5	6.5	13	97	
<90	45	429.5	1.5	3	3	

Tabla 36. Porcentaje de material HIPS acumulado & Dm - 1.2 mm, 75% RPM, 100% Vf

Granulometría HIPS. e1: 1.2 mm, 75 % RPM, 100 % Alimentación						
Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	293	0	0	0	237.48
600-500	550	276	0.5	1	1	
500-425	462.5	279	4	8	9	
425-300	362.5	264	7	14	23	
300-212	256	265	16	32	55	
212-150	181	251	10.5	21	76	
150-90	120	248	9	18	94	
<90	45	431	3	6	100	

Tabla 37. Porcentaje de material HIPS acumulado & Dm - 1.2 mm, 75% RPM, 75% Vf

Granulometría HIPS. e1: 1.2 mm, 75 % RPM, 75 % Alimentación						
Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	293	0	0	1	246.87
600-500	550	276	0.5	1	2	
500-425	462.5	279	4	8	8	
425-300	362.5	267	10	20	59	
300-212	256	264	15	30	83	
212-150	181	249	8.5	17	93	
150-90	120	248	9	18	99	
<90	45	431	3	6	100	

Tabla 38. Porcentaje de material HIPS acumulado & Dm - 1.2 mm, 50% RPM, 100% Vf

Granulometría HIPS. e1: 1.2 mm, 50 % RPM, 100 % Alimentación						
Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	293	0	0	0	225.38
600-500	550	277	1.5	3	3	
500-425	462.5	279	4	8	11	
425-300	362.5	263	6	12	23	
300-212	256	260	11	22	45	
212-150	181	251	10.5	21	66	
150-90	120	251.5	12.5	25	91	
<90	45	432.5	4.5	9	100	

Tabla 39. Porcentaje de material HIPS acumulado & Dm - 1.2 mm, 50% RPM, 75% Vf

Granulometría HIPS. e1: 1.2 mm, 50 % RPM, 75 % Alimentación						
Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	293	0	0	0	245.73
600-500	550	277	1.5	3	3	
500-425	462.5	281	6	12	15	
425-300	362.5	265	8	16	31	
300-212	256	259.5	10.5	21	52	
212-150	181	249	8.5	17	69	
150-90	120	250.5	11.5	23	92	
<90	45	432	4	8	100	

Tabla 40. Porcentaje de material HIPS acumulado & Dm - 0.6 mm, 100% RPM, 100% Vf

Granulometría HIPS. e2: 0.6 mm, 100 % RPM, 100 % Alimentación						
Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	293	0	0	0	322.475
600-500	550	277	1.5	3	3	
500-425	462.5	286.5	11.5	23	26	
425-300	362.5	275	18	36	62	
300-212	256	256	7	14	76	
212-150	181	246	5.5	11	87	
150-90	120	244	5	10	97	
<90	45	429.5	1.5	3	3	

Tabla 41. Porcentaje de material HIPS acumulado & Dm - 0.6 mm, 100% RPM, 75% Vf

Granulometría HIPS. e2: 0.6 mm, 100 % RPM, 75 % Alimentación						
Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	293	0	0	0	310.55
600-500	550	276	0.5	1	1	
500-425	462.5	284	9	18	19	
425-300	362.5	278	21	42	61	
300-212	256	256	7	14	75	
212-150	181	246	5.5	11	86	
150-90	120	244	5	10	96	

<90	45	430	2	4	100
-----	----	-----	---	---	-----

Tabla 42. Porcentaje de material HIPS acumulado & Dm - 0.6 mm, 75% RPM, 100% Vf

Granulometría HIPS. e2: 0.6 mm, 75 % RPM, 100 % Alimentación

Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	293	0	0	0	211.025
600-500	550	276	0.5	1	1	
500-425	462.5	278	3	6	7	
425-300	362.5	262.5	5.5	11	18	
300-212	256	259	10	20	38	
212-150	181	255.5	15	30	68	
150-90	120	251	12	24	92	
<90	45	432	4	8	100	

Tabla 43. Porcentaje de material HIPS acumulado & Dm - 0.6 mm, 75% RPM, 75% Vf

Granulometría HIPS. e2: 0.6 mm, 75 % RPM, 75 % Alimentación

Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	293	0	0	0	243.885
600-500	550	276.5	1	2	2	
500-425	462.5	279.5	4.5	9	11	
425-300	362.5	266	9	18	29	
300-212	256	260.5	11.5	23	52	
212-150	181	252	11.5	23	75	
150-90	120	248.5	9.5	19	94	
<90	45	431	3	6	100	

Tabla 44. Porcentaje de material HIPS acumulado & Dm - 0.6 mm, 50% RPM, 100% Vf

Granulometría HIPS. e2: 0.6 mm, 50 % RPM, 100 % Alimentación

Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	293	0	0	0	226.485
600-500	550	276	0.5	1	1	
500-425	462.5	280.5	5.5	11	12	
425-300	362.5	265	8	16	28	
300-212	256	256.5	7.5	15	43	
212-150	181	251	10.5	21	64	
150-90	120	252	13	26	90	

<90	45	433	5	10	100
-----	----	-----	---	----	-----

Tabla 45. Porcentaje de material HIPS acumulado & Dm - 0.6 mm, 50% RPM, 75% Vf

Granulometría HIPS. e2: 0.6 mm, 50 % RPM, 75 % Alimentación

Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	293.5	0.5	1	1	243.945
600-500	550	276.5	1	2	3	
500-425	462.5	279	4	8	11	
425-300	362.5	265.5	8.5	17	28	
300-212	256	260.5	11.5	23	51	
212-150	181	252.5	12	24	75	
150-90	120	248.5	9.5	19	94	
<90	45	431	3	6	100	

Tabla 46. Porcentaje de material HIPS acumulado & Dm - 0.3 mm, 100% RPM, 100% Vf

Granulometría HIPS. e3: 0.3 mm, 100 % RPM, 100 % Alimentación

Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	293	0.	0	0	318.48
600-500	550	276	0.5	1	1	
500-425	462.5	282	7	14	15	
425-300	362.5	281	24	48	63	
300-212	256	259	10	20	83	
212-150	181	244.5	4	8	91	
150-90	120	242	3	6	97	
<90	45	429.5	1.5	3	100	

Tabla 47. Porcentaje de material HIPS acumulado & Dm - 0.3 mm, 100% RPM, 75% Vf

Granulometría HIPS. e3: 0.3 mm, 100 % RPM, 75 % Alimentación

Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	293	0	0	0	270.765
600-500	550	276	0.5	1	1	
500-425	462.5	279.5	4.5	9	10	
425-300	362.5	273	16	32	42	
300-212	256	260.5	11.5	23	65	
212-150	181	248.5	8	16	81	
150-90	120	246.5	7.5	15	96	

<90	45	430	2	4	100
-----	----	-----	---	---	-----

Tabla 48. Porcentaje de material HIPS acumulado & Dm - 0.3 mm, 75% RPM, 100% Vf

Granulometría HIPS. e3: 0.3 mm, 75 % RPM, 100 % Alimentación

Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	293	0	0	0	251.415
600-500	550	276	0.5	1	1	
500-425	462.5	278	3	6	7	
425-300	362.5	270.5	13.5	27	34	
300-212	256	261	12	24	58	
212-150	181	250.5	10	20	78	
150-90	120	247.5	8.5	17	95	
<90	45	430.5	2.5	5	100	

Tabla 49. Porcentaje de material HIPS acumulado & Dm - 0.3 mm, 75% RPM, 75% Vf

Granulometría HIPS. 0.3 mm, 75 % RPM, 75 % Alimentación

Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	293.5	0.5	1	1	239.015
600-500	550	277	1.5	3	4	
500-425	462.5	279	4	8	12	
425-300	362.5	263.5	6.5	13	25	
300-212	256	260	11	22	47	
212-150	181	254	13.5	27	74	
150-90	120	249	10	20	94	
<90	45	431	3	6	100	

Tabla 50. Porcentaje de material HIPS acumulado & Dm - 0.3 mm, 50% RPM, 100% Vf

Granulometría HIPS. e3: 0.3 mm, 50 % RPM, 100 % Alimentación

Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	293	0	0	0	236.85
600-500	550	277	1.5	3	3	
500-425	462.5	281	6	12	15	
425-300	362.5	264	7	14	29	
300-212	256	256.5	7.5	15	44	
212-150	181	253	12.5	25	69	

150-90	120	250	11	22	91
<90	45	432.5	4.5	9	100

Tabla 51. Porcentaje de material HIPS acumulado & Dm - 0.3 mm, 50% RPM, 75% Vf

Granulometría HIPS. 0.3 mm, 50 % RPM, 75 % Alimentación

Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	293	0	0	0	233.8
600-500	550	276	0.5	1	1	
500-425	462.5	280	5	10	11	
425-300	362.5	265	8	16	27	
300-212	256	259	10	20	47	
212-150	181	253	12.5	25	72	
150-90	120	249	10	20	92	
<90	45	432	4	8	100	

PVC rígido

Tabla 52. Porcentaje de material PVC rígido acumulado & Dm - 1.2 mm, 100% RPM, 100% Vf

Granulometría PVC. e1: 1.2 mm, 100 % RPM, 100 % Alimentación

Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	293	0.00	0	0	397.54
600-500	550	278	2.50	5	5	
500-425	462.5	293	18.00	36	41	
425-300	362.5	282	25.00	50	91	
300-212	256	253	4.00	8	99	
212-150	181	241	0.50	1	100	
150-90	120	239	0.00	0	100	
<90	45	428	0.00	0	100	

Tabla 53. Porcentaje de material PVC rígido acumulado & Dm - 1.2 mm, 100% RPM, 75% Vf

Granulometría PVC. e1: 1.2 mm, 100 % RPM, 75 % Alimentación						
Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	293	0	0	0	395.98
600-500	550	278	2	4	4	
500-425	462.5	294	18	36	40	
425-300	362.5	283.5	26	52	92	
300-212	256	252	3	6	98	
212-150	181	241.5	1	2	100	
150-90	120	239	0	0	100	
<90	45	428	0	0	100	

Tabla 54. Porcentaje de material PVC rígido acumulado & Dm - 1.2 mm, 75% RPM, 100% Vf

Granulometría PVC. e1: 1.2 mm, 75 % RPM, 100 % Alimentación						
Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	293	0	0	0	389.19
600-500	550	278	2.5	5	5	
500-425	462.5	292	17	34	39	
425-300	362.5	282	25	50	89	
300-212	256	252	3	6	95	
212-150	181	242	1.5	3	98	
150-90	120	240	1	2	100	
<90	45	428	0	0	100	

Tabla 55. Porcentaje de material PVC rígido acumulado & Dm - 1.2 mm, 75% RPM, 75% Vf

Granulometría PVC. e1: 1.2 mm, 75 % RPM, 75 % Alimentación						
Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	293	0	0	0	414.95
600-500	550	278	2.5	5	5	
500-425	462.5	302	27	54	59	
425-300	362.5	274	17	34	93	
300-212	256	251	2	4	97	
212-150	181	241	0.5	1	98	
150-90	120	240	1	2	100	
<90	45	428	0	0	100	

Tabla 56. Porcentaje de material PVC rígido acumulado & Dm - 1.2 mm, 50% RPM, 100% Vf

Granulometría PVC. e1: 1.2 mm, 50 % RPM, 100 % Alimentación						
Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	293	0	0	0	357.6
600-500	550	290	14.5	29	29	
500-425	462.5	280	5	10	39	
425-300	362.5	269	12	24	63	
300-212	256	255	6	12	75	
212-150	181	244.5	4	8	83	
150-90	120	247	8	16	99	
<90	45	428.5	0.5	1	100	

Tabla 57. Porcentaje de material PVC rígido acumulado & Dm - 1.2 mm, 50% RPM, 75% Vf

Granulometría PVC. e1: 1.2 mm, 50 % RPM, 75 % Alimentación						
Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	293.5	0.5	1	1	345.99
600-500	550	281.5	6	12	13	
500-425	462.5	287.5	12.5	25	38	
425-300	362.5	264.5	7.5	15	53	
300-212	256	262.5	13.5	27	80	
212-150	181	249	8.5	17	97	
150-90	120	240.5	1.5	3	100	
<90	45	428	0	0	100	

Tabla 58. Porcentaje de material PVC rígido acumulado & Dm - 0.6 mm, 100% RPM, 100% Vf

Granulometría PVC. e2: 0.6 mm, 100 % RPM, 100 % Alimentación						
Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	293	0	0	0	384.67
600-500	550	280	4.5	9	9	
500-425	462.5	291	16	32	41	
425-300	362.5	277	20	40	81	
300-212	256	255	6	12	93	
212-150	181	243	2.5	5	98	
150-90	120	240	1	2	100	
<90	45	428	0	0	100	

Tabla 59. Porcentaje de material PVC rígido acumulado & Dm - 0.6 mm, 100% RPM, 75% Vf

Granulometría PVC. e2: 0.6 mm, 100 % RPM, 75 % Alimentación						
Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	293.5	0	0	0	457.42
600-500	550	293.5	16.5	33	33	
500-425	462.5	297	21	42	75	
425-300	362.5	267	9	18	93	
300-212	256	253	2.5	5	98	
212-150	181	241.5	1	2	100	
150-90	120	239	0	0	100	
<90	45	428	0	0	100	

Tabla 60. Porcentaje de material PVC rígido acumulado & Dm - 0.6 mm, 75% RPM, 100% Vf

Granulometría PVC. e2: 0.6 mm, 75 % RPM, 100 % Alimentación						
Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	293.5	0.5	1	1	426.725
600-500	550	288.5	13	26	27	
500-425	462.5	287	12	24	51	
425-300	362.5	276.5	19.5	39	90	
300-212	256	253.5	4.5	9	99	
212-150	181	241	0.5	1	100	
150-90	120	239	0	0	100	
<90	45	428	0	0	100	

Tabla 61. Porcentaje de material PVC rígido acumulado & Dm - 0.6 mm, 75% RPM, 75% Vf

Granulometría PVC. e2: 0.6 mm, 75 % RPM, 75 % Alimentación						
Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	293.5	0.5	1	1	428.79
600-500	550	288.5	13	26	27	
500-425	462.5	287.5	12.5	25	52	
425-300	362.5	276.5	19.5	39	91	
300-212	256	253	4	8	99	
212-150	181	241	0.5	1	100	
150-90	120	239	0	0	99	
<90	45	428	0	0	100	

Tabla 62. Porcentaje de material PVC rígido acumulado & Dm - 0.6 mm, 50% RPM, 100% Vf

Granulometría PVC. e2: 0.6 mm, 50 % RPM, 100 % Alimentación						
Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	294.5	1.5	3	3	356.945
600-500	550	276.5	1	2	5	
500-425	462.5	278.5	3.5	7	12	
425-300	362.5	290	33	66	78	
300-212	256	259	10	20	98	
212-150	181	241.5	1	2	100	
150-90	120	239	0	0	100	
<90	45	428	0	0	100	

Tabla 63. Porcentaje de material PVC rígido acumulado & Dm - 0.6 mm, 50% RPM, 75% Vf

Granulometría PVC. e2: 0.6 mm, 50 % RPM, 75 % Alimentación						
Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	294	1	2	2	309.105
600-500	550	276	0.5	1	3	
500-425	462.5	278	3	6	9	
425-300	362.5	273.5	16.5	33	42	
300-212	256	274.5	25.5	51	93	
212-150	181	244	3.5	7	100	
150-90	120	239	0	0	100	
<90	45	428	0	0	100	

Tabla 64. Porcentaje de material PVC rígido acumulado & Dm - 0.3 mm, 100% RPM, 100% Vf

Granulometría PVC. e3: 0.3 mm, 100 % RPM, 100 % Alimentación						
Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	293.5	0	0	0	328.585
600-500	550	278	1	2	2	
500-425	462.5	280.5	4.5	9	11	
425-300	362.5	282	24	48	59	
300-212	256	269	18.5	37	96	
212-150	181	243	2	4	100	
150-90	120	239	0	0	100	
<90	45	428	0	0	100	

Tabla 65. Porcentaje de material PVC rígido acumulado & Dm - 0.3 mm, 100% RPM, 75% Vf

Granulometría PVC. e3: 0.3 mm, 100 % RPM, 75 % Alimentación						
Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	293.5	0.5	1	1	353.105
600-500	550	277	1.5	3	4	
500-425	462.5	284	9	18	22	
425-300	362.5	279.5	22.5	45	67	
300-212	256	265	16	32	99	
212-150	181	241	0.5	1	100	
150-90	120	239	0	0	100	
<90	45	428	0	0	100	

Tabla 66. Porcentaje de material PVC rígido acumulado & Dm - 0.3 mm, 75% RPM, 100% Vf

Granulometría PVC. e3: 0.3 mm, 75 % RPM, 100 % Alimentación						
Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	294.5	1.5	3	3	376.05
600-500	550	282	6.5	13	16	
500-425	462.5	282	7	14	30	
425-300	362.5	277	20	40	70	
300-212	256	263	14	28	98	
212-150	181	241.5	1	2	100	
150-90	120	239	0	0	100	
<90	45	428	0	0	100	

Tabla 67. Porcentaje de material PVC rígido acumulado & Dm - 0.3 mm, 75% RPM, 75% Vf

Granulometría PVC. 0.3 mm, 75 % RPM, 75 % Alimentación						
Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	293.5	0.5	1	1	418.665
600-500	550	286	10.5	21	22	
500-425	462.5	287.5	12.5	25	47	
425-300	362.5	279	22	44	91	
300-212	256	252.5	3.5	7	98	
212-150	181	241.5	1	2	100	
150-90	120	239	0	0	100	
<90	45	428	0	0	100	

Tabla 68. Porcentaje de material PVC rígido acumulado & Dm - 0.3 mm, 50% RPM, 100% Vf

Granulometría PVC. e3: 0.3 mm, 50 % RPM, 100 % Alimentación

Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	294	1	2	2	427.11
600-500	550	287.5	12	24	26	
500-425	462.5	285.5	10.5	21	47	
425-300	362.5	280.5	23.5	47	94	
300-212	256	251.5	2.5	5	99	
212-150	181	241	0.5	1	100	
150-90	120	239	0	0	100	
<90	45	428	0	0	100	

Tabla 69. Porcentaje de material PVC rígido acumulado & Dm - 0.3 mm, 50% RPM, 75% Vf

Granulometría PVC. 0.3 mm, 50 % RPM, 75 % Alimentación

Tamiz	Tamaño promedio (µm)	Peso Tamiz C/M	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	Tamaño promedio de partícula (Dm)
>600	650	293	0	0	0	381.78
600-500	550	280	4.5	9	9	
500-425	462.5	283.5	8.5	17	26	
425-300	362.5	287.5	30.5	61	87	
300-212	256	255	6	12	99	
212-150	181	241	0.5	1	100	
150-90	120	239	0	0	100	
<90	45	428	0	0	100	

ANEXO 4. ENSAYO DE ÍNDICE DE FLUIDEZ

HDPE (Polietileno de Alta Densidad)

Tabla 70. Valores de índice de fluidez - HDPE

Espaciamiento	Extruido	IFMn g/10 min	IFM prom g/10 min
1	1	1.6	1.6
	2	1.6	
	3	1.59	
	4	1.59	
	5	1.59	
	6	1.6	
	7	1.6	
2	1	1.62	1.6
	2	1.62	
	3	1.62	
	4	1.63	
	5	1.62	
	6	1.62	
	7	1.62	
3	1	1.56	1.5
	2	1.56	
	3	1.54	
	4	1.54	
	5	1.57	
	6	1.54	
	7	1.51	

HIPS (Poliestireno de alto impacto)

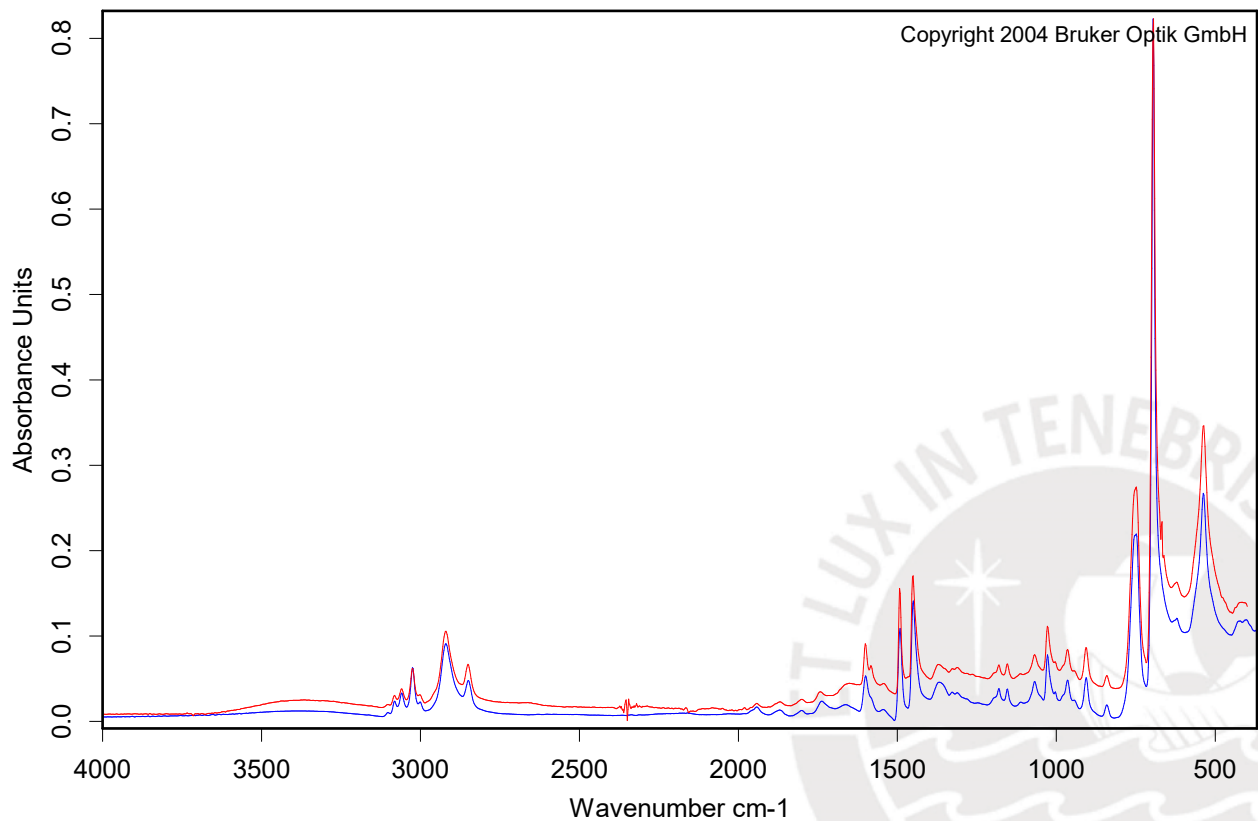
Tabla 71. Valores de índice de fluidez - HIPS

Espaciamiento	Extruido	IFMn g/10 min	IFM prom g/10 min
1	1	4.92	4.88
	2	4.93	
	3	4.90	
	4	4.88	
	5	4.84	
	6	4.84	
	7	4.84	
2	1	5.53	5.62
	2	5.60	
	3	5.48	
	4	5.65	
	5	5.64	
	6	5.69	
	7	5.75	
3	1	6.59	6.57
	2	6.61	
	3	6.63	
	4	6.64	
	5	6.52	
	6	6.5	
	7	6.5	

PVC rígido

Tabla 72. Valores de índice de fluidez - PVC rígido

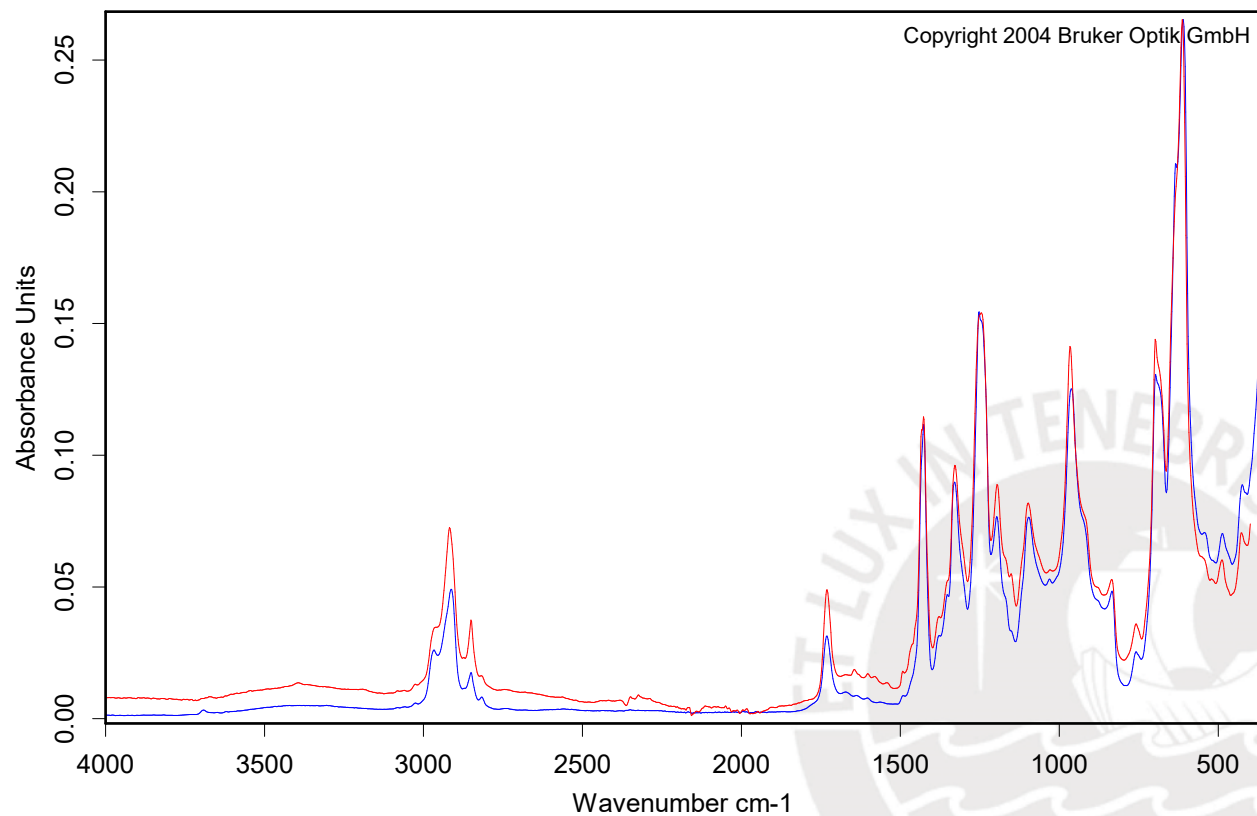
Espaciamiento	Extruido	IFMn g/10 min	IFM prom g/10 min
1	1	6.39	6.55
	2	6.43	
	3	6.46	
	4	6.54	
	5	6.59	
	6	6.7	
	7	6.72	
2	1	3.72	3.85
	2	3.76	
	3	3.81	
	4	3.87	
	5	3.96	
	6	3.90	
	7	3.93	
3	1	2.07	2.07
	2	2.08	
	3	2.07	
	4	2.06	
	5	2.07	
	6	2.05	
	7	2.06	



Polymer Classification	High Impact Polystyrene (HIPS)
Trade Name	Polystyrol 456 M
Manufacturer	BASF AG
Melting Point	Melt Temperature Range: 180°C - 260°C
Density	1050 kg/m3
Colour	white
Chemical / Physical Description	Polystyrol 456 F is an impact resistant polystyren
Source of Spectrum	BRUKER OPTIK GMBH, Ettlingen, Germany
Type of Spectrometer	TENSOR 27
Measurement Technique	Attenuated Total Reflectance (ATR), Diamond-Cr

Color	Hit Quality	Compound name	CAS Number	Molecular formula	Molecular weight
	913	High Impact Polystyrene (HIPS)			

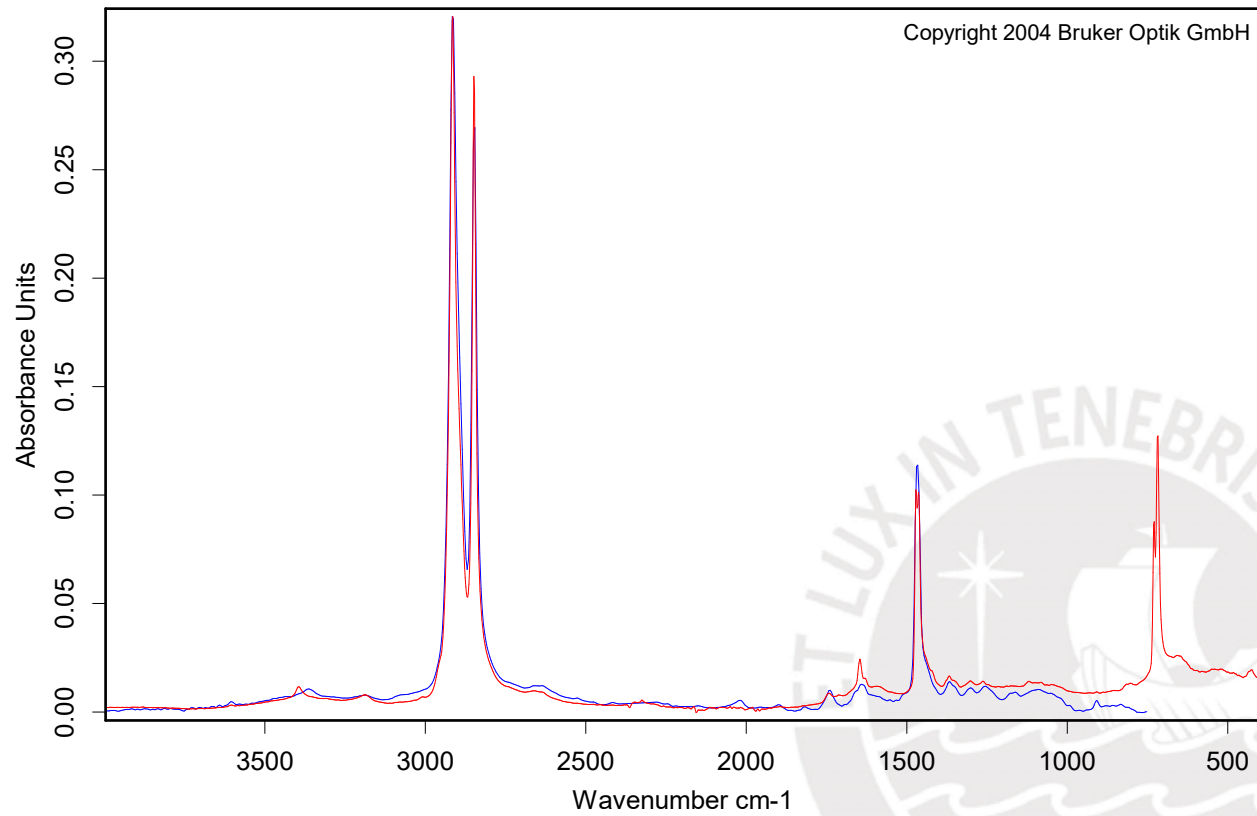
Color	File	Path	Spectrum Type
	Lamina Blanca.0	D:\2. TESISTAS E INVESTIGACION\David Sagastegui	Query Spectrum



Polymer Classification	Polyvinyl Chloride - Hard (PVC-Hard)
Trade Name	Folie EZ 23
Manufacturer	Hoechst AG
Colour	nature-bluish
Source of Spectrum	BRUKER OPTIK GMBH, Ettlingen, Germany
Type of Spectrometer	SENSOR 27
Measurement Technique	Attenuated Total Reflectance (ATR), Diamond-Cr
Entry No.	73
Library name	BPAD.S01
Library description	Bruker Optics ATR-Polymer Library

Color	Hit Quality	Compound name	CAS Number	Molecular formula	Molecular weight
	969	Polyvinyl Chloride - Hard (PVC-Hard)			

Color	File	Path	Spectrum Type
	Lamina Transparente sin color.0	D:\2. TESISTAS E INVESTIGACION\David Sagastegui	Query Spectrum



Name	Polyethylene
Color	white
Company	Berkley
Entry No.	105
Library name	SYNTHETIC FIBERS ATR LIBRARY.S01
Library description	A Collection of Synthetic Fibres
Copyright	Copyright 2004 Bruker Optik GmbH

Color	Hit Quality	Compound name	CAS Number	Molecular formula	Molecular weight
	901	Polyethylene			

Color	File	Path	Spectrum Type
	Scrap color Blanco.0	D:\2. TESISTAS E INVESTIGACION\David Sagastegui	Query Spectrum