

Portada Externa de Tesis

Emmanuel
Estrada
Anaya

Evaluación de la estabilidad y flujo de una
mezcla asfáltica con sustitución parcial de
asfalto por residuos plásticos

2025



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

Evaluación de la estabilidad y flujo de una
mezcla asfáltica con sustitución parcial de
asfalto por residuos plásticos

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el
grado de

Maestro en Ingeniería de
Vías Terrestres y Movilidad

Presenta

Ing. Emmanuel Estrada Anaya

Santiago de Querétaro, Qro, 2025

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



Portada Interna de Tesis

Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería de Vías
Terrestres y Movilidad

Evaluación de la estabilidad y flujo de una mezcla asfáltica con
sustitución parcial de asfalto por residuos plásticos

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestro en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Presenta:

Ing. Emmanuel Estrada Anaya

Dirigido por:

Dra. Teresa López Lara

SINODALES

Dra. Teresa López Lara
Presidente

Firma

Dra. Jaime Horta Rangel
Secretario

Firma

Dra. María de la Luz Pérez Rea
Vocal

Firma

Dr. Juan Bosco Hernández
Suplente

Firma

Dr. Ricardo Montoya Zamora
Suplente

Firma

Dra. María de la Luz Pérez Rea
Directora de la Facultad

Dr. Juan Carlos Antonio Jauregui Correa
Director de Investigación y
Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
2025
México

RESUMEN

En el presente trabajo se evalúa la estabilidad y flujo de una mezcla asfáltica con sustitución parcial de asfalto con residuos plásticos añadidos a la mezcla mediante el método seco, se realiza la comparativa mediante la elaboración de especímenes de control elaborados mediante diseño Marshall y posteriormente la adición a de LDPE (Low-density polyethylene) y PP (Polypropylene) por separado y en proporciones 40/60 y 50/50 y posteriormente elaboradas las mezclas asfálticas y los especímenes ensayarlos en la prensa Marshall para así obtener los parámetros de estabilidad y flujo de la mezcla y así disminuir en un 10% el contenido de asfalto de la mezcla de control, para comparar los valores obtenidos y obtener cual es la mejor combinación de residuos plásticos, La adición de LDPE muestra un aumento significativo en la estabilidad, pero con comportamiento dúctil que supera los 7 mm de flujo. El PP, por otro lado, aumenta la estabilidad hasta 2.8 veces y presenta una ligera reducción en el flujo con un 10% de residuo. La combinación 60 LDPE 40 PP equilibra deformación y estabilidad, superando especificaciones mínimas. ambos plásticos permiten reducir el asfalto en un 10%. LDPE mejora estabilidad, pero con flujo significativo, mientras que el PP presenta mayor estabilidad y ligera reducción en flujo, como línea futura de investigación se sugiere evaluar este tipo de mezcla con criterios de susceptibilidad de la mezcla a la humedad y de la deformación permanente que puede presentar.

(Palabras clave: Mezcla asfáltica, Residuos plásticos, LDPE (Low-density polyethylene), PP (Polypropylene), Marshall)

SUMMARY

In this study, the property of stability and flow of an asphalt mix with partial asphalt substitution using added plastic waste are evaluated through the dry method. The comparison is conducted by preparing control specimens using the Marshall design, followed by the addition of LDPE (Low-density polyethylene) and PP (Polypropylene) separately and in proportions of 40/60 and 50/50. Subsequently, the asphalt mixes and specimens are tested in the Marshall press to obtain stability and flow parameters, aiming to reduce the asphalt content by 10% in the control mix. The addition of LDPE demonstrates a significant increase in stability but exhibits ductile behavior that surpasses 7 mm of flow. On the other hand, PP enhances stability up to 2.8 times and shows a slight reduction in flow with 10% residue. The 60 LDPE 40 PP combination balances deformation and stability, exceeding minimum specifications. Both plastics allow for a 10% reduction in asphalt. LDPE improves stability but with significant flow, while PP exhibits higher stability and a slight reduction in flow. As a future research direction, it is suggested to assess this type of mixture based on susceptibility to moisture and permanent deformation.

(Key words: Asphalt Mixture, Plastic Waste, LDPE (Low-density polyethylene), PP (Polypropylene), Marshall)

A mi hermano y papás
Francisco, Maribel y Humberto

AGRADECIMIENTOS

A la Facultad de Ingeniería y Universidad Autónoma de Querétaro.

A la Dra. Teresa López por su apoyo y guía fundamental durante la maestría

A mi familia por su confianza e incondicional apoyo.

A mis profesores por su esmero en cada clase y todo lo aprendido de ellos dentro y fuera del aula.

INDICE

	Página
Portada Externa de Tesis	1
Portada Interna de Tesis.....	2
RESUMEN.....	3
SUMMARY	4
AGRADECIMIENTOS.....	6
INDICE.....	7
INDICE DE CUADROS.....	9
INDICE DE FIGURAS.....	10
1. INTRODUCCION	13
1.1 Justificación	13
1.2 Descripción del problema:	14
1.3 Hipótesis	16
1.4 Objetivo General.....	16
1.5 Objetivos Específicos.....	16
2. REVISION DE LITERATURA.....	17
Introducción:	17
2.1 Pavimentos	18
2.1.1 Tipos de Pavimentos	18
2.2 Mezclas asfálticas.....	20
2.2.1 Tipos de Mezclas Asfálticas.....	21
2.2.2 Agregados pétreos.....	23
2.2.3 Cemento Asfáltico.....	24
2.2 Diseño de mezclas asfálticas.....	26
2.3 Método Marshall	26
2.4 Prueba Marshall.....	27
2.5 PP (Polypropylene)	27
2.6 LDPE (Low Density Polyethylene)	28
2.7 Incorporación de residuos a la mezcla.....	28
2.7.1 Procedimiento de incorporación de residuos	31
2.7.2 Método Húmedo	32
2.7.3 Método Seco.....	32
3. METODOLOGIA.....	33
3.1 Selección y trituración de residuos plásticos	34

3.2	Caracterización de los materiales pétreos	34
3.3	Elaboración y ensaye de mezcla asfáltica de control.....	35
3.4	Elaboración y ensaye de mezclas asfálticas adicionadas con residuos plásticos.....	36
3.5	Selección de la mejor mezcla	36
3.6	Comparación con la mezcla de control	36
3.7	Evaluación de resultados y prueba de hipótesis	37
4.	RESULTADOS Y DISCUSION.....	38
4.1	Selección y trituración de residuos plásticos.....	38
4.2	Caracterización de los materiales pétreos	39
4.3	Elaboración y ensaye de mezcla asfáltica de control.....	47
4.4	Elaboración y ensaye de mezclas asfálticas adicionadas con residuos plásticos.....	58
	.....	69
4.5	Especímenes con residuos plásticos combinados	70
	.....	71
4.6	Selección de la mejor mezcla.....	72
4.7	Comparación con la mezcla de control	74
4.8	Evaluación de resultados y prueba de hipótesis	75
4.9	Conclusiones.....	78
4.10	Anexos.....	82
	APENDICE	87

INDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
2.1 Granulometría ASTM D3515	24
3.1 Diseño experimental	35
4.1.1 Ficha Técnica Polipropileno	38
4.1.2 Ficha Técnica Polipropileno	38
4.2.1 Ensaye Granulométrico Agregado $\frac{3}{4}$ "	39
4.2.2 Ensaye Granulométrico Agregado $\frac{1}{2}$ "	40
4.2.3 Ensaye Granulométrico Agregado $\frac{3}{8}$ "	41
4.2.4 Ensaye Granulométrico Agregado Arena	42
4.2.5 Granulometría ASTM D3515	43
4.2.6 Combinación granulométrica	44
4.2.7 Propiedades de agregado grueso	45
4.2.8 Propiedades de agregado fino	46
4.3.1 Índices asfálticos	49
4.3.2 Área superficial de las partículas	49
4.3.3 Cálculo del contenido mínimo de asfalto	49
4.3.4 Cálculo Inverso de Granulometría	50

4.3.5	Ensaye Densidad del Cuerpo de Ingenieros DCI	51
4.3.6	Volumetría de especímenes Marshall	52
4.3.7	Propiedades de mezcla de control	56
4.4.1	Pesos de combinaciones ajustadas	61
4.4.2	Resumen de resultados especímenes adicionados con LDPE	62
4.4.3	Resumen de resultados especímenes adicionados con PP	64
4.5.1	Resumen de resultados especímenes adicionados con PP y LDPE	70
4.7.1	Comparación de resultados con la mezcla de control	75

INDICE DE FIGURAS

Figura	Página	
2.1	Capas constitutivas de un pavimento flexible	19
2.2	Capas constitutivas de un pavimento rígido	19
3.1	Metodología	33
4.2.1	Granulometría Agregado 3/4"	40
4.2.2	Granulometría agregado 1/2"	41
4.2.3	Granulometría agregado 3/8"	42
4.2.4	Granulometría agregado Arena	43

4.2.5	Granulometría Combinación de Agregados	45
4.2.6	Ensayes desgaste microdeval y desgaste de los ángeles	46
4.2.7	Ensayes Azul de metileno y equivalente de arena	47
4.3.1	Curva de Viscosidad-Temperatura	48
4.3.2	Contenido de asfalto respecto al pétreo contra vacíos en la mezcla	53
4.3.3	Contenido de asfalto respecto al pétreo contra vacíos en el agregado mineral	53
4.3.4	Contenido de asfalto respecto al pétreo contra vacíos llenos de asfalto	54
4.3.5	Contenido de asfalto respecto al pétreo contra estabilidad	54
4.3.6	Contenido de asfalto respecto al pétreo contra flujo	55
4.3.7	Contenido de asfalto respecto al pétreo contra peso volumétrico	55
4.3.8	Especímenes de diseño finalizados	56
4.3.9	Ensaye de especímenes de diseño	57
4.3.10	Especímenes de diseño ensayados	57
4.4.1	Separación y pesada de agregados para lograr granulometría	59
4.4.2	Comprobación de peso granulometría	59
4.4.3	Mezclado de agregado pétreo, asfalto y residuo plástico	60
4.4.4	Identificación de mezcla para curado en horno	60

4.4.5	Especímenes terminados después de compactación	61
4.4.6	Contenido de Residuo plástico contra estabilidad, LDPE	62
4.4.7	Contenido de Residuo plástico contra flujo, LDPE	63
4.4.8	Contenido de Residuo plástico contra Peso Volumétrico, LDPE	63
4.4.9	Contenido de Residuo plástico contra estabilidad, PP	65
4.4.10	Contenido de Residuo plástico contra flujo, PP	65
4.4.11	Contenido de Residuo plástico contra Peso Volumétrico, PP	66
4.4.12	Mezclado de agregado, asfalto y residuos plásticos	67
4.4.13	Espécimen elaborado con LDPE	67
4.4.14	Espécimen elaborado con PP	68
4.4.15	Contenido de Residuo plástico contra estabilidad, LDPE y PP	69
4.4.16	Contenido de Residuo plástico contra flujo, LDPE y PP	69
4.5.1	Contenido de Residuo plástico contra flujo, LDPE y PP Combinados	71
4.5.2	Contenido de Residuo plástico contra flujo, LDPE y PP Combinados	72
4.6.1	Contenido de Residuo plástico contra estabilidad, LDPE y PP Combinados	73
4.6.2	Contenido de Residuo plástico contra flujo, LDPE y PP Combinados	74

1. INTRODUCCION

1.1 Justificación

Autores como Zoorob y Suparma (2000) trabajaron en una mezcla asfáltica adicionada con 30% en volumen de LDPE (Low-density polyethylene) sin requerir modificaciones en el proceso y técnicas de producción de mezcla en planta, además de tener propiedades de estabilidad aproximadamente de 2.5 veces más que las mezclas que utilizaron como referencia para control, por otra parte Dalhat & Wahhub (2017) encuentran que los residuos de plásticos que han sido reciclados mejoran en módulo de resiliencia de mezclas asfálticas en caliente en las que se adicionó el 2% de PP (Polypropylene). En los casos antes mencionados se hace uso del mismo contenido de asfalto tanto en la mezcla de control como en las mezclas modificadas.

Dicho lo anterior, surge una necesidad de evaluar un enfoque diferente en la utilización de residuos plásticos en mezclas asfálticas como lo es disminuir el porcentaje de asfalto con referencia a una mezcla de control a partir de la mejora de las propiedades de estabilidad con la incorporación de residuos plásticos en específico como el LDPE y PP.

1.2 Descripción del problema:

En este trabajo se parte de dos problemáticas principales, por una parte, se hace énfasis en la persistente práctica del uso del asfalto en la construcción de pavimentos flexibles como principal ligante en mezclas para carpeta en México las cuales, si bien han estandarizado un costo de producción, se pretende poder disminuir dicho costo utilizando alternativas al adicionar materiales de desecho plásticos; y por otro lado se busca el enfoque de mirar hacia el ámbito ambiental por medio de la reutilización de residuos plásticos.

Derivado de dicha problemática se realiza una revisión de la utilización de métodos que impliquen el uso del asfalto en el ámbito de obra pública en México, y mediante datos obtenidos de (Secretaría de la Función Pública, 2021) en su sitio web de licitaciones públicas nacionales COMPRANET 5.0. se encuentra que en el año 2021 el 92% del presupuesto de las obras correspondientes a la Red Carretera Federal a ejecutar en el estado de Querétaro se realizan por procedimiento de “Conservación periódica mediante trabajos de capa asfáltica de alto desempeño nivel II”, lo cual implica el uso de cemento asfáltico como principal producto en la conservación de carreteras y la evaluación de los parámetros de alto desempeño en mezclas.

En vista de que el asfalto es un material el cual sigue predominando su utilización en la construcción y conservación de carreteras, se deben buscar alternativas que impliquen el uso de materiales alternos en combinación con el asfalto para elaborar mezclas sustentables, como tal es el caso de los desperdicios de plástico. Es por ello que reforzar la investigación sobre la adición de plásticos de desperdicio a las mezclas asfálticas como reductores de contenido de asfalto óptimo aporta para considerarse en su uso de manera cotidiana en la red carretera nacional.

Según White & Magee (2019), los desafíos ambientales derivados de los residuos plásticos, como plásticos industriales, bolsas y botellas, están en constante aumento. Esto ha generado una notable preocupación por el reciclaje de estos desechos, especialmente para su aplicación en materiales que puedan emplearse en la

construcción. La magnitud del problema se evidencia en cifras proporcionadas por UNEP (2018), que indican la compra global de un millón de botellas de plástico desechables por minuto y el uso anual de hasta 5 billones de bolsas plásticas de un solo uso en todo el mundo. En el ámbito local, la Ciudad de México produce 123 toneladas de residuos plásticos sólidos anualmente, de acuerdo con la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2020), con una gestión deficiente. Ante esta situación, autores como Reyes et al. (2012) enfatizan la importancia de tomar conciencia sobre la cultura de "usar y desechar", reconociendo que los desechos cotidianos albergan recursos que pronto escasearán. En consecuencia, se aboga por la implementación práctica de las tres erres: reducir, reutilizar y reciclar, priorizando estas acciones en ese orden específico.

Pan et al. (2020) advierten que hoy en día, los productos de plástico están íntimamente relacionados con la vida humana. Si bien brindan comodidad a los seres humanos, también hay excelentes amenazas para la salud y el medio ambiente. La mayoría de los productos plásticos son compuestos poliméricos obtenidos por polimerización por adición o polimerización por condensación. Causará envenenamiento crónico a los humanos si se usan productos plásticos de uso prolongado. Además, Debido al costo de producción relativamente bajo y la corta vida útil de los productos de plástico, se desecha una gran cantidad de desechos plásticos. cada año, lo que provoca graves problemas ambientales.

Al utilizar residuos plásticos como aditivo en las mezclas asfálticas se busca reducir el contenido de asfalto en la mezcla, lo que impactaría directamente en el costo económico de construcción de carpeta asfáltica, además de que se contribuiría en el manejo de desechos plásticos y una vez encontrado un porcentaje óptimo de plástico como aditivo en la mezcla es posible estimar la utilización de kg de residuos plásticos por kilómetro construido de carpeta asfáltica.

1.3 Hipótesis

“Con la adición de residuos de plástico LDPE y PP en la mezcla asfáltica se logra una disminución de 10% o menor del contenido de asfalto utilizado en una mezcla de control sin afectar las propiedades de estabilidad y flujo de una mezcla de control”.

1.4 Objetivo General

El objetivo general en este trabajo de investigación consta en evaluar las propiedades de estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en las que se adicionan dos tipos de residuos: plásticos, LDPE y PP aplicando una reducción del 10% del asfalto utilizado en una mezcla de control para determinar la factibilidad de la adición de residuos plásticos.

1.5 Objetivos Específicos

Encontrar el tipo de residuo plástico que muestre mayor reducción de contenido asfáltico en la mezcla y obtenga el mejor resultado de estabilidad y flujo.

Evaluar la reducción de contenido de cemento asfáltico en las mezclas elaboradas adicionadas con LDPE y PP.

2. REVISION DE LITERATURA

Introducción:

Balaguera *et al.* (2018) sustenta que la infraestructura carretera constituye una base fundamental para contribuir a la el desarrollo de todas las economías nacionales, pues asegura la seguridad económica y beneficios sociales además aseguran que las vías públicas son una de las mayores fuentes de ingresos para la mayoría de los países.

De acuerdo con Plati Christina (2019) los materiales utilizados como componentes básicos de la construcción pavimento, definen las características estructurales y el nivel de calidad de los pavimentos. Además, los materiales utilizados desempeñan un papel importante en el equilibrio ambiental, económico y social. Una parte de los principios de sustentabilidad en lo que respecta a los pavimentos, es la selección de materiales ecológicos a bajo costo, simultáneamente teniendo en cuenta los impactos sociales. Aprovechamiento de residuos materiales y subproductos, es también una estrategia sostenible, mientras que al mismo tiempo el uso de rellenos sanitarios, la deposición de existencias y los desechos eliminación, se minimizan. La sostenibilidad del pavimento se basa en gran medida después de la selección adecuada de los materiales. Convencionalmente la mayoría los materiales del pavimento se derivan de fuentes no renovables, dañando el medio ambiente. Debido a este hecho, el origen material es un factor clave para la mitigación del impacto ambiental.

En este capítulo se revisara la conceptualización básica de los elementos a tratar en la investigación, desde la comprensión de “Pavimento” como entorno global de interés en el que se centra la investigación para después desglosarle en tipos de pavimentos y mezclas asfálticas utilizadas para su construcción, con ello se deriva conceptualizar también al tipo de agregados pétreos y ligantes asfálticos que se utilizaran para la elaboración de mezclas asfálticas, además un panorama general de los residuos plásticos y los tipos requeridos en esta investigación y los métodos de incorporación de los mismos en las mezclas asfálticas.

2.1 Pavimentos

Thieves & Ghisi (2017) mencionan que las carreteras se construyen en varias capas, que consisten en subrasante, subbase, base y capa superficial. Estas capas juntas constituyen un pavimento. El pavimento se puede construir a partir de una amplia variedad de materiales y mezclas de materiales consistentes en grava, piedra, asfalto, suelos de hormigón o mejorados. Los tipos de materiales y espesores de las capas de pavimento se determinan de acuerdo con el tráfico esperado densidad.

De acuerdo con Téllez (2012) El "pavimento", según su definición, constituye una estructura compuesta de manera heterogénea por suelos y rocas naturales, que el ingeniero selecciona, procesa y transforma para desarrollar estratos resistentes que, en su conjunto, sean capaces de soportar las cargas transmitidas por los vehículos y estén expuestos a las condiciones naturales de la región durante toda su vida útil de servicio. Las discrepancias abordadas en este artículo se centran en la capa superior encargada de proporcionar la superficie de rodamiento, ya sea mediante concreto hidráulico o una mezcla asfáltica.

2.1.1 Tipos de Pavimentos

La American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), (1993) refiere que los pavimentos flexibles generalmente consisten en un lecho de carretera preparado por debajo con capas de subbase, base y superficie, en algunos casos, la subbase y/o la base se estabilizan para maximizar el uso de materiales locales.

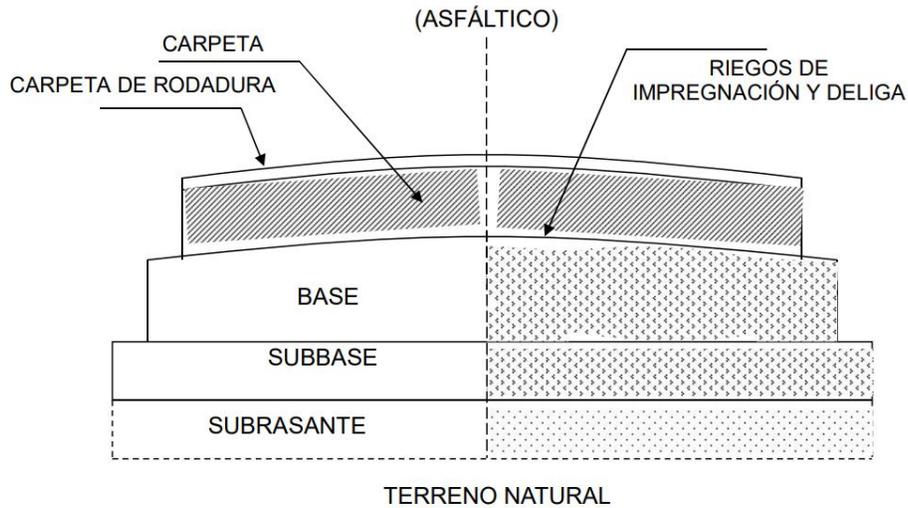


Figura 2.1. Capas constitutivas de un pavimento flexible

Fuente: Cabrera (2013)

En el contexto de los pavimentos rígidos, las losas de concreto hidráulico conforman la superficie de rodamiento, tal como señala Cabrera (2013). Estas losas distribuyen las cargas vehiculares a lo largo de toda la superficie de la losa y las adyacentes, colaborando de manera conjunta con la losa que recibe directamente las cargas. A diferencia de otros tipos de pavimentos, este no tiene la capacidad de adaptarse a las deformaciones de las capas inferiores sin experimentar un fallo estructural. El autor presenta un diagrama de las capas constitutivas de un pavimento rígido en la figura 2.2.

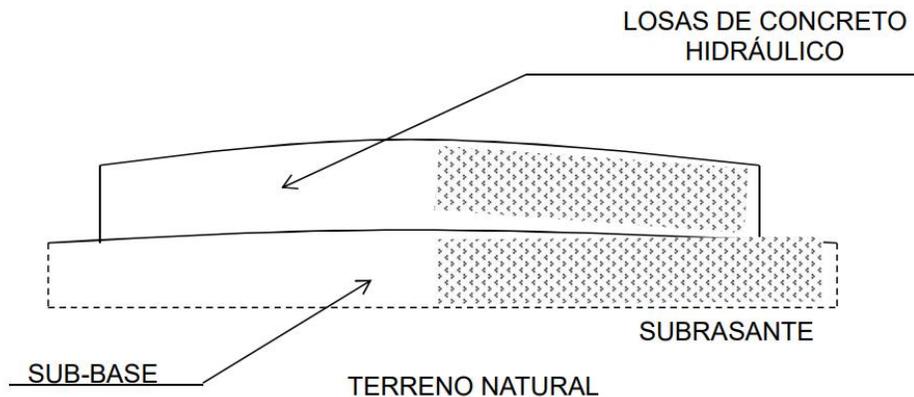


Figura 2.2. Capas constitutivas de un pavimento rígido

Fuente: Cabrera (2013)

Aunque Thieves & Ghisi (2017) sugieren la existencia de tres tipos principales de pavimentos: flexibles (pavimento asfáltico), rígidos (pavimento de hormigón de cemento Portland) y compuestos (capas flexibles y rígidas en un mismo pavimento), la elección del tipo a emplear en una carretera implica considerar varios factores, como el tráfico, el rendimiento del material, el diseño y la ubicación. La decisión sobre el tipo de pavimento a utilizar tiene un impacto directo en la experiencia de los usuarios, asegurando un viaje seguro, suave, silencioso, duradero, económico y construido con materiales sostenibles.

2.2 Mezclas asfálticas

Las mezclas bituminosas, también llamadas aglomerados bituminosos, se conforman fundamentalmente, según lo indicado por Alarcón (2003), por medio de la combinación de agregados pétricos y un aglutinante, de modo que los áridos queden envueltos por una película continua de asfalto. Diversas clasificaciones se han propuesto para estas mezclas, dependiendo del parámetro que se utilice para su diferenciación. Según Reyes (2008), la mezcla desempeña la función de una estructura de soporte a la que le hace llamar “esqueleto” ya que esta misma aporta resistencia y rigidez a la estructura del pavimento, propiedades generales que están condicionadas por las propiedades individuales de los materiales, las condiciones ambientales y la carga que soporta la vía.

Segura (2016) Define como características comunes de las mezclas asfálticas algunas como las que se mencionan a continuación:

- Estabilidad: Se refiere a la aptitud para soportar la deformación bajo las cargas del tráfico, evidenciándose en hundimientos, ondulaciones y otros signos que denotan alteraciones en la mezcla.
- Durabilidad: Corresponde a la capacidad para resistir la influencia de los factores climáticos y del tráfico, manifestándose a través de la desintegración del agregado, modificaciones en las propiedades del asfalto y separación de las capas asfálticas.

- Impermeabilidad: Indica la resistencia al paso de aire y agua hacia el interior del pavimento.
- Flexibilidad: Se refiere a la capacidad del pavimento para adaptarse sin generar grietas a movimientos y asentamientos graduales de la subrasante.
- Resistencia a la fatiga: Representa la capacidad de la mezcla para soportar flexiones repetidas bajo las cargas del tráfico, expresando su habilidad para deformarse de manera repetitiva sin fracturarse.
- Resistencia al deslizamiento: Es la capacidad de proporcionar suficiente fricción para reducir al mínimo el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de los vehículos, especialmente en condiciones de superficie mojada

2.2.1 Tipos de Mezclas Asfálticas

Las mezclas asfálticas, que varían en su composición y requisitos de calidad, consisten en agregados pétreos con distintas granulometrías. Además, muestran diversidades en función de su papel en la estructura del pavimento y del tipo de material bituminoso o ligante empleado.

Mezclas asfálticas en frío: Según Jiménez et al. (2009), las mezclas asfálticas en frío se definen como una combinación de agregado mineral, con o sin relleno mineral, junto con asfalto emulsionado o rebajado, y todo el proceso se realiza a temperatura ambiente. Además, Ramos (2013) señala que cuando se emplea emulsión asfáltica en estas mezclas, el asfalto tiene una viscosidad reducida, facilitando el trabajo y la compactación. Este tipo de mezclas no requiere el calentamiento de los agregados y se utiliza comúnmente en trabajos de bacheo o en carreteras con tráfico liviano. Se aconseja llevar a cabo la aplicación en condiciones climáticas con temperaturas no inferiores a los 20 °C ni superiores a los 40 °C.

Mezclas Asfálticas en Caliente:

La categorización de una mezcla asfáltica en caliente se debe a que tanto el agregado

pétreo como el ligante asfáltico se calientan antes de mezclarse, y su colocación también se realiza a elevadas temperaturas. Esta variedad de mezcla suele estar compuesta mayormente por un 93 a 97 % de agregado pétreo y un 3 a 7 % de asfalto en relación con la masa total de la mezcla según Ayala *et al.*, 2018.

Mezcla asfáltica de Granulometría densa:

Delgado (2020) describe a la mezcla asfáltica de granulometría densa como una combinación caliente, uniforme y homogénea, producida con cemento asfáltico y materiales pétreos debidamente graduados, cuyo tamaño nominal oscila entre treinta y siete comas cinco (37,5) milímetros (1½ in) y nueve comas cinco (9,5) milímetros (¾ in), y que cumple con los estándares de calidad establecidos en la Cláusula D de la Norma N-CMT-4-04/17 (2017) sobre Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas. Generalmente se emplea en la construcción de capas asfálticas para pavimentos recién creados, donde se demanda una capacidad estructural en proporción al nivel de tránsito.

Mezclas asfálticas de granulometría abierta:

Según las disposiciones de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) establecidas en la normativa N-CMT-4-05-003/08 (2008) sobre la Calidad de Mezclas Asfálticas para Carreteras, se define como una mezcla en caliente, uniforme, homogénea y con un elevado porcentaje de vacíos, compuesta por cemento asfáltico y materiales pétreos con granulometría uniforme, cuyo tamaño nominal varía entre 12.5 milímetros y 6.3 milímetros. Esta composición debe cumplir con los estándares de calidad estipulados en la normativa N-CMT-4-04/17 (2017) referente a Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas. Generalmente, estas mezclas se utilizan para formar las capas de rodadura y no tienen una función estructural. Se colocan comúnmente sobre una carpeta de granulometría densa con el propósito principal de cumplir con los requisitos de calidad para el rodamiento del tránsito. Este objetivo se alcanza permitiendo que la lluvia sea desplazada por las llantas de los vehículos, llenando los vacíos de la carpeta. Este proceso mejora la fricción entre las llantas y la superficie de

rodadura, reduce el riesgo de acuaplaneo, minimiza la cantidad de agua proyectada sobre los vehículos cercanos y mejora la visibilidad del señalamiento horizontal.

Mezclas Open-Graded y Gap-Graded:

Minaya & Ordoñez (2006) proporcionan una panorámica detallada de las mezclas open-graded y gap-graded. Mientras que las mezclas open-graded se caracterizan por tener una distribución de tamaño de partículas relativamente uniforme y un aglutinante de cemento asfáltico o ligante modificado, su principal propósito radica en actuar como una capa drenante, ya sea en la superficie del pavimento o en su estructura. En cuanto a las mezclas gap-graded, su función es semejante a la de las mezclas de gradación densa, ya que también proporcionan capas densas e impermeables cuando se lleva a cabo una compactación adecuada. Las mezclas gap-graded convencionales han sido empleadas durante un extenso periodo y abarcan un rango de tamaños de agregados que va desde gruesos hasta finos, con una presencia limitada de tamaños intermedios..

Mezclas asfálticas SMA:

Paredes (2009) caracteriza el "Stone Mastic Asphalt" (SMA) como una variante dentro de la familia de las mezclas asfálticas en caliente, también conocidas como Hot Mix Asphalt (HMA). Esta mezcla se clasifica como gap-graded, lo que significa que presenta una granulometría semiabierta o discontinua. A pesar de su similitud con las mezclas densas, ambas capaces de generar capas impermeables en la estructura del pavimento mediante una compactación adecuada, no se consideran completamente densas. La distinción entre ellas radica en la granulometría de los agregados y en las propiedades específicas que cada una aporta..

2.2.2 Agregados pétreos

Rondón (2009) utiliza la designación técnica "agregados pétreos" para referirse a la combinación de partículas, como, arenas, gravas y finos, en pavimentos. En términos

generales, en un análisis de granulometría mediante cribado o tamizado, las partículas con un diámetro que oscila entre 2 mm y 6.4 cm se clasifican como gravas. Aquellas con un diámetro entre 0.075 mm y 2 mm se reconocen como arenas, pudiendo ser gruesas o finas, mientras que las partículas con un diámetro inferior a 0.075 mm se identifican como arcilla.

Se trabajará con una mezcla densa, por lo que la granulometría requerida deberá satisfacer las condiciones granulométricas establecidas en la normativa ASTM D3515 (2009) para una mezcla D-4. Con tamaño nominal de 3/4", (19 mm).

Cuadro 2.1 Granulometría ASTM D3515

Sieve Size	Dense Mixtures								
	D-1	D-2	D-3	D-4	Mix Designation D-5	D-6	D-7	D-8	D-9
	50 mm (2 in.)	37.5 mm (1½ in.)	25.0 mm (1 in.)	19.0 mm (¾ in.)	12.5 mm (½ in.)	9.5 mm (⅜ in.)	4.75 mm (No. 4) (Sand Asphalt)	2.36 mm (No. 8)	1.18 mm (No. 16) (Sheet Asphalt)
Grading of Total Aggregate (Coarse Plus Fine, Plus Filler if Required) Amounts Finer Than Each Laboratory Sieve (Square Opening), Weight %									
63-mm (2½ in.)	100	...	...	...	...	...	...	...	...
50-mm (2 in.)	90 to 100	100	...	...	...	...	...	...	...
37.5-mm (1½ in.)	...	90 to 100	100	...	...	...	...	...	...
25.0-mm (1 in.)	60 to 80	...	90 to 100	100	...	...	...	...	...
19.0-mm (¾ in.)	...	56 to 80	...	90 to 100	100	...	...	...	...
12.5-mm (½ in.)	35 to 65	...	56 to 80	...	90 to 100	100	...	...	...
9.5-mm (⅜ in.)	...	...	...	56 to 80	...	90 to 100	100	...	...
4.75-mm (No. 4)	17 to 47	23 to 53	29 to 59	35 to 65	44 to 74	55 to 85	80 to 100	...	100
2.36-mm (No. 8) ^A	10 to 36	15 to 41	19 to 45	23 to 49	28 to 58	32 to 67	65 to 100	...	95 to 100
1.18-mm (No. 16)	...	...	...	...	...	...	40 to 80	...	85 to 100
600-µm (No. 30)	...	...	...	...	...	...	25 to 65	...	70 to 95
300-µm (No. 50)	3 to 15	4 to 16	5 to 17	5 to 19	5 to 21	7 to 23	7 to 40	...	45 to 75
150-µm (No. 100)	...	...	...	...	...	...	3 to 20	...	20 to 40
75-µm (No. 200) ^B	0 to 5	0 to 6	1 to 7	2 to 8	2 to 10	2 to 10	2 to 10	...	9 to 20

Fuente: ASTM D3515

2.2.3 Cemento Asfáltico

De acuerdo con Ruiz (2013), el cemento asfáltico es un producto bituminoso que muestra una consistencia semi-sólida a temperatura ambiente, elaborado mediante un proceso de destilación de hidrocarburos naturales. Este material posee una cantidad muy reducida de agentes volátiles, presenta propiedades aglomerantes y es prácticamente soluble en tricloroetileno. En su definición, Ruiz (2013) caracteriza al asfalto como un material cementante altamente adhesivo e impermeable, cuya consistencia varía entre sólida y semisólida a temperaturas ambiente. Se encuentra tanto en yacimientos naturales como en productos derivados de refinerías. La

composición del asfalto incluye un 90 al 95% en peso de carbono e hidrógeno, clasificándolo como un hidrocarburo, conocido como la fracción orgánica. El restante porcentaje está formado por dos tipos de átomos: heteroátomos, como O₂, N₂, S, y metales como Ni, Fe, V, identificados como la fracción inorgánica.

Se mencionan las propiedades más destacables de un cemento asfáltico:

- Viscosidad: Característica de un fluido que se opone al flujo cuando se le aplica una fuerza. Los fluidos altamente viscosos ofrecen mayor resistencia al flujo en comparación con aquellos de baja viscosidad que fluyen con facilidad; la viscosidad guarda una relación inversa con la temperatura.
- Elasticidad: Propiedad que tienen los materiales para recuperar su forma después de que se elimina o reduce la carga que los deformó.
- Resistencia al corte: Capacidad de resistir altas temperaturas, evaluada mediante un reómetro de corte dinámico que aplica una fuerza cortante cosenoidal para medir dicha resistencia.
- Ductilidad: La capacidad de un material para disipar energía dentro de su rango plástico se conoce como ductilidad. La ruptura del material está vinculada a su deformación, y en el contexto del asfalto, una ductilidad apropiada generalmente se correlaciona con propiedades aglomerantes mejoradas. Es importante señalar que los asfaltos con una ductilidad excesivamente alta suelen ser sensibles a las variaciones de temperatura.
- Pérdida de masa: La pérdida de solventes, medida con un máximo del 0.8% en la prueba RTFO.

Khan et al. (2016) Definen el comportamiento del asfalto pues al ser un material viscoelástico; por lo tanto, su consistencia y los mecanismo de adhesión se ven afectados por la tasa de carga y temperatura, a altas temperaturas y bajo cargas de movimiento lento, el asfalto se comporta como un líquido viscoso, mientras que a bajas temperaturas y bajo cargas rápidas, se comporta como un sólido elástico. Cuando se utiliza un aglutinante inadecuado en la mezcla o la mezcla está expuesta a cargas

ambientales o vehiculares no consideradas en el diseño de la mezcla, la falla prematura podría ocurrir, incluyendo fatiga, agrietamiento longitudinal y en bloque, ahuellamiento, baches.

2.2 Diseño de mezclas asfálticas

Garnica et al. (2004) indican que a lo largo del tiempo se han empleado diversos métodos para diseñar mezclas asfálticas, siendo la principal diferencia entre ellos los equipos de compactación. En el ámbito de laboratorio, el propósito de estos equipos radica en replicar de manera óptima la densificación alcanzada por una mezcla asfáltica en el campo, donde el acomodo de partículas y el porcentaje de vacíos de aire (V_a) son los parámetros clave en la densificación. La evaluación de las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica implica la consideración de diversos parámetros, tales como el volumen de vacíos en el agregado mineral (VAM), los vacíos llenos de asfalto (VFA) y el porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica compactada (V_a). Estos aspectos son determinados mediante ensayos mecánicos, que incluyen la medición de la gravedad específica del agregado mineral (G_{sb}), la gravedad específica de la mezcla asfáltica compactada (G_{mb}) y la gravedad teórica máxima de la mezcla asfáltica (G_{mm}).

2.3 Método Marshall

Estabilidad Marshall: “La prueba de estabilidad de Marshall estima la carga máxima que puede ser transportado por un espécimen de prueba bajo estándar temperaturas de prueba. La resistencia de la probeta es medida en kilogramos por área de prueba. una maquina especial conocido como aparato de estabilidad Marshall se utiliza para calcular los resultados de la prueba. El valor del caudal se define como la deformación de la carga máxima donde estructural comienza a la falla” (Gulsven et al. 2019)

Para consolidar las muestras, se emplea un aparato de acero que consta de una base redonda y plana con un diámetro de 98.4 mm (3 7/8") y un pistón de 4.536 g (10 lb). Este dispositivo está instalado de manera que el pistón pueda descender

libremente desde una altura de 457.2 mm (18"). El sistema incluye un pedestal de compactación, que es una pieza prismática de madera con dimensiones de 200 x 200 x 460 mm (8 x 8 x 18") con una placa de acero de 305 x 305 x 25 mm (12 x 12 x 1"). La base de madera debe ser de roble o pino y tener una densidad seca en el rango de 670 a 770 kg/m³. El mazo Marshall es un componente esencial de la metodología Marshall, ideada por Bruce Marshall, experto en asfaltos del Departamento de Autopistas del estado de Mississippi. Este método utiliza ejemplares de prueba estandarizados con una altura de 64 mm (2 ½") y un diámetro de 102 mm (4").

2.4 Prueba Marshall

Zoorob & Suparma (2000) hablan de la prueba Marshall y la definen como una prueba empírica en el cual especímenes cilíndricos compactos con 100 mm de diámetro y altura que debe ser cercana a 63.5 mm son inmersos en agua a 60°C por 30/40 min y después cargados hasta la falla, usando moldes de acero en forma de anillos curvados que abrazan diámetro de los especímenes compactados a un rango constante de 51 mm de compresión por minuto, la estabilidad Marshall se da en kN y corresponde a la carga máxima registrada mientras ocurre la compresión, el flujo es la deformación que ocurre cuando la máxima carga se presenta. La proporción entre la estabilidad (kN) y flujo (mm) es llamada cociente Marshall (MQ) (Marshall quotient) y es un indicador de la rigidez en la mezcla. Garnica et al. (2004) subrayan que la metodología original de Marshall solo es adecuada para mezclas asfálticas en caliente destinadas a pavimentación que posean agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1") o menor. El método modificado se diseñó para considerar tamaños máximos de 38 mm (1.5").

2.5 PP (Polypropylene)

Koerner & Koerner (2018) caracterizan al polipropileno como un termoplástico ampliamente utilizado para la fabricación de geosintéticos por su

eficacia en términos económicos. El polipropileno se forma a través de la polimerización del gas de propileno a altas temperaturas, y sus propiedades clave incluyen densidad baja, alta temperatura de servicio, resistencia y rigidez. Según Angelone et al. (2015), el polipropileno se encuentra en diversos productos, como tapas de botellas, bolsas, componentes de electrodomésticos, juguetes, medicamentos y envases de alimentos, entre otros. El proceso para su reciclaje se realiza en instalaciones especializadas, y el producto reciclado puede adquirir diversas formas finales.

2.6 LDPE (Low Density Polyethylene)

Ghuzlan *et al.* (2013) catalogan a el polietileno, como un plástico que representa el 34% del mercado total de plásticos, es el plástico con la mayor producción del mercado, el Polietileno se puede dividir principalmente en dos categorías: LDPE (Low density polyethylene) con una densidad entre 0,91 y 0,94, y HDPE (High density polyethylene) con una densidad superior a 0,94, que se fabrican por polimerización alta y baja presión, respectivamente, Sastri (2014) Sugiere como propiedades del Polietileno de baja densidad, la excelente resistencia química, buena flexibilidad con buena resistencia a la fatiga, buenas propiedades dieléctricas, baja permeabilidad a la humedad y alta flexibilidad, y también se mencionan como desventajas baja resistencia al esfuerzo a tensión. Ma *et al.* (2021) usan como ejemplo de uso de este tipo de plástico en las bolsas de plástico, bandejas y plástico agrícola, para invernadero, su punto de fusión va de los 110 a los 120°C.

2.7 Incorporación de residuos a la mezcla

Figuroa *et al.* (2009) indica que “Una posible clasificación de los polímeros se puede realizar dividiéndolos en termoplásticos y termoestables, dependiendo de su respuesta a los cambios de temperatura. También existen otras categorizaciones basadas en diferentes propiedades; por ejemplo, los elastómeros son polímeros que

se deforman cuando se les aplica una fuerza y prácticamente vuelven a su forma original cuando cesa la fuerza. Algunos modificadores poliméricos incluyen:

- Homopolímeros: compuestos por una sola unidad estructural (monómero).
- Copolímeros: compuestos por varias unidades estructurales distintas (EVA, SBS).
- Elastómeros: materiales que, al estirarse más allá de su punto de fluencia, no recuperan su longitud inicial al cesar la tensión; muestran deformacionesseudoplásticas con poca elasticidad.

Un tipo de modificador de asfaltos es el plástico ya sea en estado virgen o de reúso, Ma et al. (2020) asegura que el uso de plástico y caucho reciclados para la modificación del asfalto está ganando cada vez más atención en el desarrollo de pavimentos sostenibles dentro de la comunidad científica. Kalantar et al. (2012) resaltan como la incorporación de residuos plásticos en los pavimentos asfálticos es visualizada como una posible práctica sostenible, ya que parece haber un consenso común entre los investigadores en que ciertos polímeros y plásticos mejoran en gran medida el rendimiento y la vida útil del pavimento cuando se mezcla adecuadamente con asfalto en las condiciones óptimas.

Autores como Hake *et al.* (2019) se suman a la idea de que el uso de plásticos en la construcción de caminos está ganando importancia últimamente debido a que los caminos adicionados con plástico se comportan mejor que los caminos ordinarios, además de que se encuentra el uso para una amenaza de contaminación.

Como otro ejemplo de esta práctica se consideran investigaciones como la de Appiah *et al.* (2017) en donde se sustenta que la adición de modificadores

termoplásticos a la mezcla asfáltica convencional es destacada por mejorar el comportamiento viscoelástico y cambiar sus propiedades reológicas.

Hasta este punto es imprescindible la pregunta de ¿Qué porcentaje de modificador debe agregarse para obtener resultados similares?, pues en cifras concretas algunos investigadores sugieren un porcentaje de incorporación de desperdicios plásticos en la mezcla; Mashaan *et al.* (2021) Encontraron que el porcentaje ideal de desperdicios plásticos para adicionar en una mezcla asfáltica es de 6-8% para mejorar la resistencia al envejecimiento del asfalto, además que añadir más del 8% mejora la resistencia al agrietamiento por fatiga, entonces la aplicación de residuos plásticos no solo reduce costos, sino que también mejora la sustentabilidad el medio ambiente. Otros autores como Mahfouz *et al.* (2016) han utilizado porcentajes de 4-12% de contenido de plástico ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) en la mezcla sin afectar las temperaturas de mezclado, logrando aumentar hasta en un 327% la estabilidad de la mezcla en comparación con las utilizadas para control.

Como se puede apreciar, el uso de residuos plásticos en las mezclas asfálticas es una práctica fundamentada por varios autores, entre ellos Awoyera & Adesina (2020), quienes concluyen en su investigación que el uso de desperdicio de plástico usado en aplicaciones de construcción mejora significativamente la sustentabilidad en el medio ambiente y este también sirve como una fuente de materiales confiable para su uso en propósitos de construcción.

Gao *et al.* (2014) sustentan que los pavimentos asfálticos son utilizados debido a su confortabilidad y facilidad de construcción y rehabilitación, la vida de servicio de los pavimentos asfálticos se ve afectada principalmente por la calidad de la compactación, una buena calidad de compactación mejora la capacidad portante, la estabilidad en temperatura y la durabilidad del pavimento, una pobre compactación causa mayor porosidad y permeabilidad.

2.7.1 Procedimiento de incorporación de residuos

De acuerdo con Xu *et al.* (2022) Los plásticos de desecho se pueden usar como modificadores de asfalto en una variedad de formas a través de más procesos. Al principio, los plásticos de desecho se procesaban en forma de gránulos y estaban destinados a ser incorporados directamente a la planta de producción de asfalto. usualmente los gránulos son producidos a partir del 100% de residuos plásticos, con tamaños que medían entre 0,3 mm y 0,5 mm. En los últimos años, los plásticos de desecho han comenzado a ser procesados en trituración.

Para el procedimiento de incorporación de residuos plásticos en la mezcla Kalantar *et al.* (2012) hace mención de dos métodos comunes para incorporar polímeros en el asfalto, nombrándolos el método húmedo que consiste en la adición de polímeros de látex en el asfalto y el método seco que se refiere a la adición de polímeros sólidos en el asfalto, el método húmedo es relativamente fácil y libre de problema, en este método el polímero sólido se mezcla con mezcla asfáltica a altas temperaturas, la temperatura de mezclado y el tiempo de mezclado dependen del tipo de polímero. El método seco normalmente requiere un mezclado substancial para dispersar uniformemente los polímeros, en este método el polímero se mezclará con los agregados antes de agregar el asfalto. Bibi *et al.*, (2017) también menciona que hay dos procesos básicos para agregar polímero en asfaltos, proceso húmedo y seco. En el proceso húmedo, el polímero se mezcla con betún a alta temperatura para producir ligantes bituminosos, antes de su mezcla con el árido. En el proceso seco, el polímero se agrega directamente a la mezcla de asfalto, por lo que las partículas de polímero son mezcladas con los agregados antes de la adición del betún. Si se comparan ambos métodos, el proceso seco es capaz de reciclar más polímero y requiere menor modificación en la planta, en comparación con el proceso húmedo. A continuación, se describe cada método de incorporación.

2.7.2 Método Húmedo

Adou *et al.* (2018) menciona que este método es usado para la elaboración de una mezcla modificada con polímeros PMB (Polymer modified bitumen) en la cual el polímero es directamente añadido a la mezcla y se mantienen a temperaturas que van de 160°C hasta los 170°C para prevenir la degradación térmica del residuo plástico. El mezclado se realiza para obtener una adecuada dispersión del residuo de polímero en la mezcla, este proceso tiene sus limitaciones.

2.7.3 Método Seco

Adou *et al.* (2018), explica que este procedimiento implica la incorporación directa de los desechos plásticos en la mezcla asfáltica. Es esencial mantener la temperatura entre los 160°C y 170°C para evitar la degradación térmica de los residuos plásticos. Este método resulta más práctico y permite una gama más amplia de porcentajes de adición de plástico. Además, conduce a un aumento en el grosor de los especímenes y favorece el recubrimiento de los residuos plásticos con el agregado.

3. METODOLOGIA

La metodología a emplear se centra en cinco pasos que se muestran en la figura 3.1, las etapas consisten en la selección y trituración de los residuos plásticos a la par de la caracterización de los materiales pétreos a emplear para la realización de las mezclas asfálticas de control y adicionadas, para posteriormente continuar con la elaboración y ensaye para determinación de los parámetros de la mezcla asfáltica de control con diferentes porcentajes de asfalto reducido y la elaboración y ensaye de las mezclas asfálticas adicionadas con residuos plásticos con contenido de asfalto reducido en comparativa con la mezcla de control.

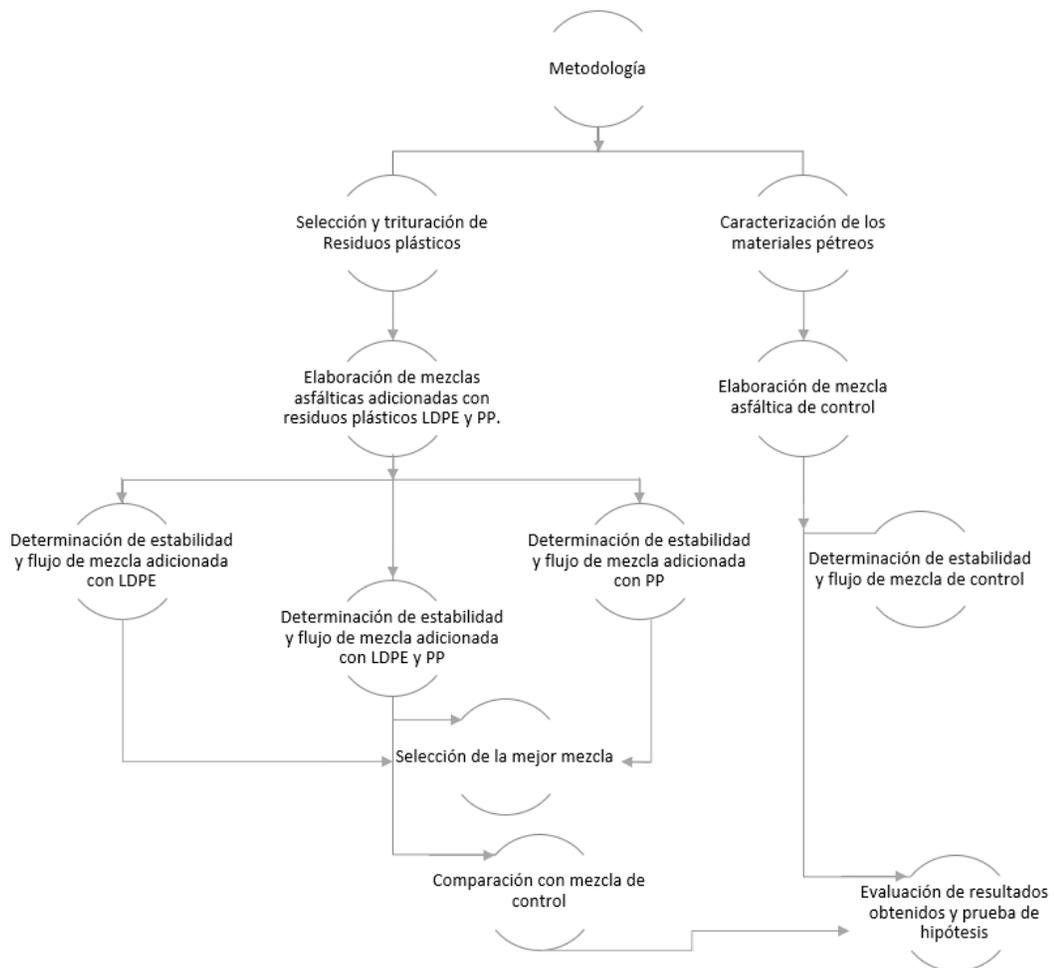


Figura 3.1. Metodología

Fuente: Elaboración propia

3.1 Selección y trituración de residuos plásticos

En esta etapa se seleccionan los residuos plásticos de LDPE y HDPE que serán incorporados a la mezcla, se buscan los métodos más viables de recolección a través de botellas de plástico, taparrosas y botellas de jabón líquido, se preparan los materiales siendo lavados y desinfectados para posteriormente llevarlos a laboratorio para su trituración.

3.2 Caracterización de los materiales pétreos

El primer paso de esta etapa es la selección y obtención de material pétreo de un banco de materiales mediante el método establecido por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes en su normativa M.MMP.4.04.001/02 correspondiente al Muestreo de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas. Una vez trasladado el material al laboratorio se implementarán las pruebas para realizar al material pétreo establecidas en la normativa M.MMP Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas, se llevarán a cabo bajo el procedimiento que indican las siguientes normativas internacionales:

- Granulometría: AASHTO T 27, (2020) Análisis que evalúa la distribución del tamaño de partículas de agregados finos y gruesos mediante el cribado.
- AASHTO T 11, (2020) Procedimiento para determinar la cantidad de material más fino que la malla No. 200 en el agregado por lavado. Se utiliza cuando se busca una precisión mayor en la determinación del porcentaje de partículas más pequeñas que la malla No. 200, especialmente en material previamente cribado seco por el procedimiento T 27.
- Desgaste / Abrasión de los Ángeles: AASHTO T 96, (2019) Ensayo que evalúa la resistencia al desgaste de una muestra de agregado grueso utilizando la máquina de los ángeles. Los resultados determinan si el agregado cumple con las normativas para su uso en

construcción.

- Desgaste Microdeval ASTM D6928-17 – 10: Prueba del Sistema Micro Deval que mide la resistencia a la abrasión y durabilidad de los agregados minerales mediante la acción de abrasión y pulido con bolas de acero en presencia de agua.
- Intemperismo Acelerado AASHTO T 104, (2020) Procedimiento para evaluar la resistencia a la desintegración de agregados por la acción de soluciones de sulfato de sodio o de magnesio.
- Partículas Alargadas y Lajeadas: ASTM D5821 – 13 (2017) Método que determina el porcentaje de masa de partículas fracturadas en una muestra de agregado grueso.

Cuadro 3.1 Diseño Experimental

Especímenes por porcentaje					
Plástico adicionado	6%	8%	10%	12%	Total
PP	3	3	3	3	12
LDPE	3	3	3	3	12
Proporción					
	40/60	50/50	60/40		
LDPE y PP	3	3	3		9
				Total	33

3.3 Elaboración y ensaye de mezcla asfáltica de control

En este proceso se realiza un diseño de mezcla asfáltica de control bajo el método de diseño Marshall, así la primera mezcla que se diseñe será de control y servirá como un parámetro de referencia de las propiedades que se pueden lograr con un contenido de asfalto dentro de lo común, Se elaborarán tres especímenes que representen a cada mezcla por medio del método ASTM D6926-04 para posteriormente llevarlas a ensayo mediante el método ASTM D6927 (2016) que corresponde al “Método de prueba estándar para la estabilidad Marshall y el flujo de mezclas bituminosas”.

3.4 Elaboración y ensaye de mezclas asfálticas adicionadas con residuos plásticos

La incorporación de los residuos plásticos se realizará mediante el método seco para todos los residuos que se agregarán, para ello Mahfouz et al. (2016) sugiere que los agregados se calienten primero y luego, el plástico reciclado y el asfalto se agreguen simultáneamente a los agregados calientes a una temperatura de 165 ° C.

“Los componentes se mezclan en una placa caliente durante 15 minutos antes de colocarlos en el horno durante el tiempo necesario para asegurar la fusión y la incorporación del plástico y permitir la absorción de los agregados. A continuación, sacar la mezcla del horno, colocarla en moldes y se compactan, para posteriormente ensayarlos por el método ASTM D6927 (201) Método de prueba estándar para la estabilidad Marshall y el flujo de mezclas bituminosas.” Mahfouz et al. (2016).

Se elegirá la mezcla que presente el mejor comportamiento por si sola para realizar las combinaciones de residuos plásticos en proporciones de 60/40 y 50/50 para posteriormente elegir la que tenga un mejor comportamiento.

3.5 Selección de la mejor mezcla

Se seleccionará la mezcla que tenga un mejor comportamiento en cuestiones de estabilidad y flujo comparada entre sí mismas de acuerdo al tipo de residuo adicionado.

3.6 Comparación con la mezcla de control

Se realiza una comparativa directa en los parámetros de estabilidad y flujo de la mejor mezcla seleccionada contra la mezcla de control y se determinan parámetros de incremento o decremento.

3.7 Evaluación de resultados y prueba de hipótesis

Se evaluarán los resultados que se obtengan en cuanto a la estabilidad y flujo en la mezcla denominada mezcla de control con asfalto reducido contra los obtenidos en las mezclas adicionadas con residuos plásticos para determinar cuál de los plásticos utilizados tiene mejores resultados en los parámetros evaluados comparándolos con la mezcla de control

4. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 Selección y trituración de residuos plásticos

Se opta por la utilización de residuos plásticos procesados en forma de Pellets obtenidos como donación por parte de la empresa SALCAN PLASTIC S.A. de C.V. especialistas en reciclaje de plástico post industrial, la donación consistió en 2 bolsas de 10 kg cada una, una de polietileno de baja densidad y otra de polipropileno, los pellets consisten en una forma oblicua aplanada con un tamaño que en promedio va de los 5.2 a los 6.2 mm en su lado más largo, se retiene en la malla No. 8. Además, se proporciona la ficha técnica de cada plástico.

Cuadro 4.1.1 Ficha técnica Polipropileno

Propiedad	Resistencia a la tensión (Mpa)	Elongación de ruptura (%)	Resistencia al impacto Izod (J/m)	Índice de fluidez (g/10min)	Esfuerzo a la flexión al 5% de deformación (Mpa)	Módulo de flexión (Mpa)	% Cenizas
Método	ASTM-D-638-14	ASTM-D-638-14	ASTM-D256-10e1	ASTM-D-1238-130	ASTM-D-790-15e2	ASTM-D-79015e2	
Valor	29.4	213	38.54	7.8	39	1295	3.94

Fuente: elaboración propia basada en datos brindados por proveedor

Cuadro 4.1.2 Ficha técnica Polietileno de Baja Densidad

Propiedad	Resistencia a la tensión (Mpa)	Elongación de ruptura (%)	Resistencia al impacto Izod (J/m)	Índice de fluidez (g/10min)	Esfuerzo a la flexión al 5% de deformación (Mpa)	Módulo de flexión (Mpa)	% Cenizas
Método	ASTM-D-638-14	ASTM-D-638-14	ASTM-D256-10e1	ASTM-D-1238-130	ASTM-D-790-15e2	ASTM-D-79015e2	
Valor	12.9	142	528.32	15.22	11.5	297.2	3.53

Fuente: elaboración propia basada en datos de proveedor

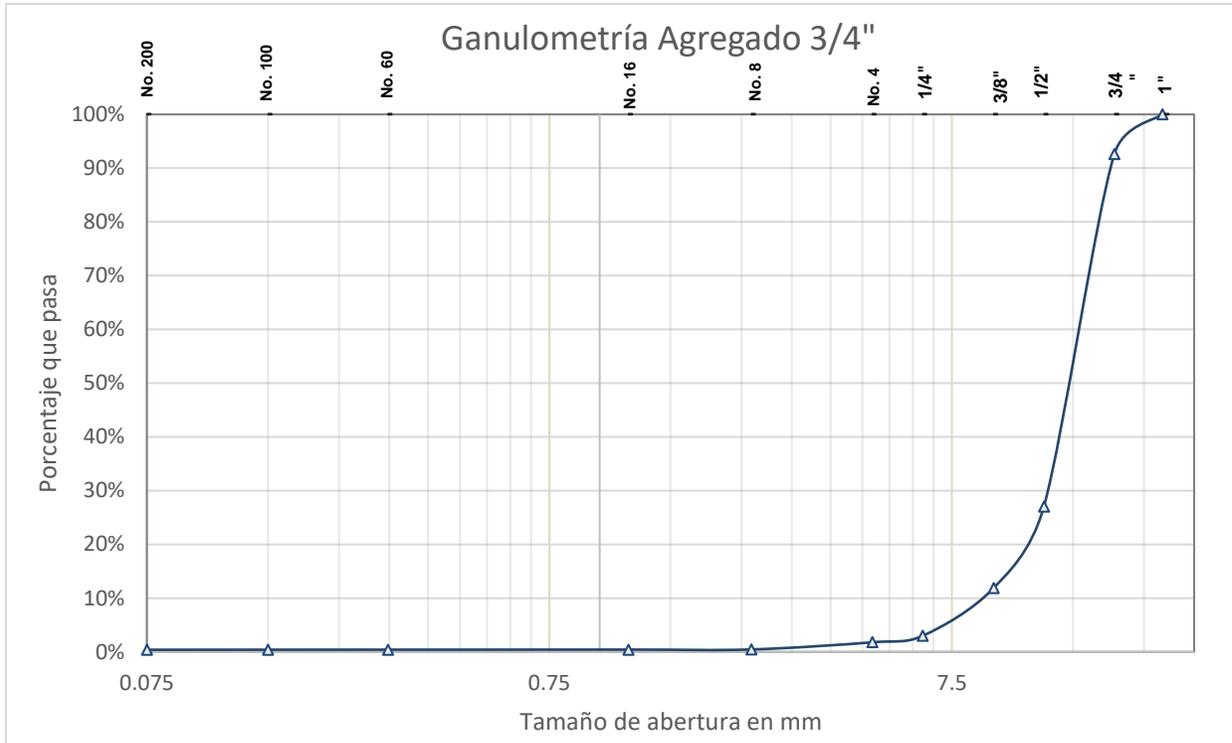
4.2 Caracterización de los materiales pétreos

Inicialmente se muestrearon los agregados pétreos en la planta trituradora de CEMEX Agregados México S.A. de C.V. en el municipio Huimilpan, Qro. ubicado en el km. 13+600 de la carretera Querétaro-Huimilpan, en donde después de una introducción de seguridad para ingresar a la planta se adquirieron los siguientes materiales. Agregado tamaño nominal ¾", agregado tamaño nominal 1/2", agregado tamaño nominal 3/8" y agregado arena a los cuales se procedió realizando el análisis granulométrico de cada parte por separado.

Cuadro 4.2.1 Ensaye Granulométrico Agregado ¾"

Malla	Abertura en mm	Retenido (g)	%Retenido	%Que pasa	%Que pasa acumulado
1	25		0.00%	100.00%	0.00%
3/4	19	922.8	7.39%	92.61%	7.39%
1/2	12.7	8190	65.57%	27.04%	72.96%
3/8	9.525	1893.1	15.16%	11.88%	88.12%
1/4	6.35	1109.1	8.88%	3.00%	97.00%
No. 4	4.76	151.6	1.21%	1.79%	98.21%
Pasa no.4		210.9	1.69%	0.10%	99.90%
Muestra fina (g)	189.2				
Corregido por humedad (g)	187.47				
No. 8	2.380	148.3	1.34%	0.45%	99.55%
No. 16	1.180	3.3	0.03%	0.42%	99.58%
No. 50	0.298	1.3	0.01%	0.41%	99.59%
No. 100	0.150	0.7	0.01%	0.41%	99.59%
No. 200	0.075	1.1	0.01%	0.40%	99.60%
		32.77	0.30%	0.10%	99.90%

Fuente: elaboración propia



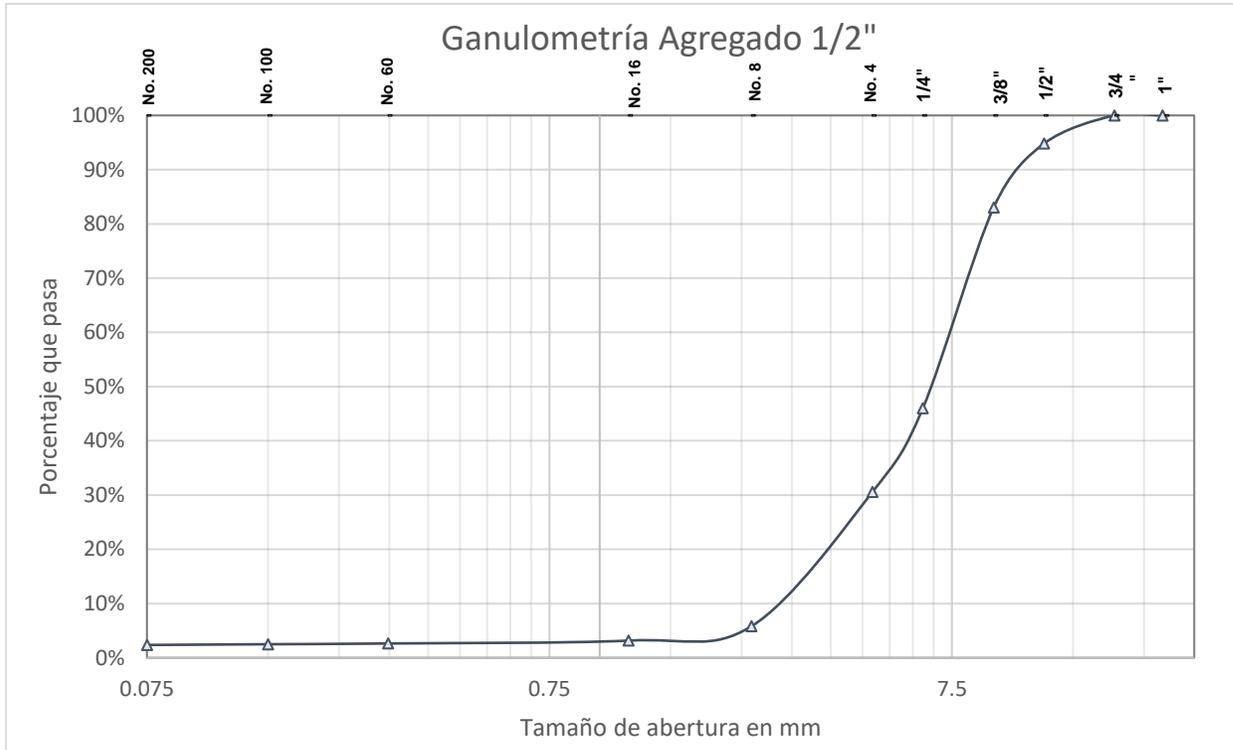


Figura 4.2.2. Granulometría agregado 1/2"

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 4.2.3 Ensayo Granulométrico Agregado 3/8"

Malla	Abertura en mm	Retenido (g)	%Retenido	%Que pasa	%Que pasa acumulado
1	25		0.00%	100.00%	0.00%
3/4	19		0.00%	100.00%	0.00%
1/2	12.7		0.00%	100.00%	0.00%
3/8	9.525	478.5	8.89%	91.11%	8.89%
1/4	6.35	2695.4	50.10%	41.01%	58.99%
No. 4	4.76	1084.5	20.16%	20.85%	79.15%
Finos		1116.6	20.75%	0.09%	99.91%
Muestra fina (g)	300				
Corregido por humedad (g)	297.43				
No. 8	2.38	279.7	19.52%	1.33%	98.67%
No. 16	1.18	11.9	0.83%	0.50%	99.50%
No. 50	0.2978	0.2	0.01%	0.49%	99.51%
No. 100	0.15	0.1	0.01%	0.48%	99.52%
No. 200	0.075	0.1	0.01%	0.47%	99.53%
		5.43	0.38%	0.09%	99.91%

Fuente: elaboración propia

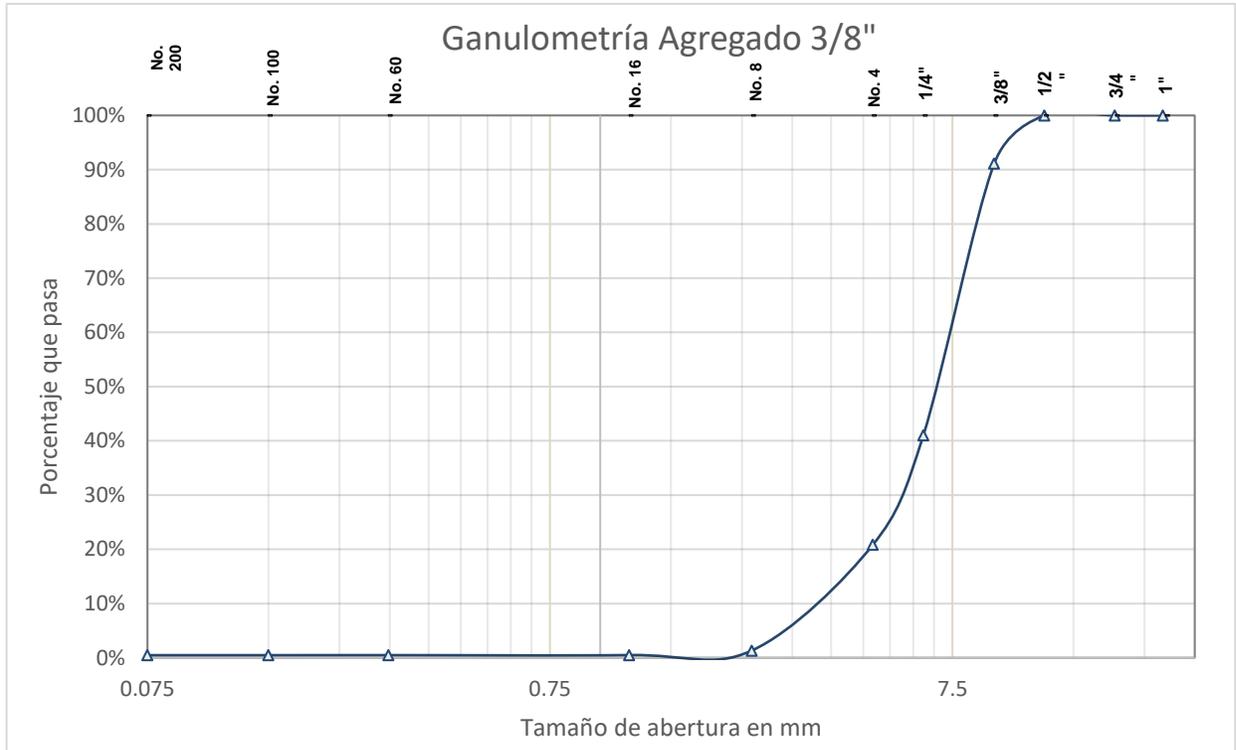


Figura 4.2.3. Granulometría agregado 3/8"

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 4.2.4 Ensaye Granulométrico Agregado Arena

Malla	Abertura en mm	Retenido (g)	%Retenido	%Que pasa	%Que pasa acumulado
1	25	0	0.00%	100.00%	0.00%
3/4	19	0	0.00%	100.00%	0.00%
1/2	12.7	0	0.00%	100.00%	0.00%
3/8	9.525	0	0.00%	100.00%	0.00%
1/4	6.35	0	0.00%	100.00%	0.00%
No. 4	4.76	0	0.00%	100.00%	0.00%
Finos			0.00%	100.00%	0.00%
Muestra fina (g)	333.5				
Cooregido por humedad (g)	331.13				
No. 4	4.76			100.00%	
No. 8	2.38	33.6	10.15%	89.85%	10.15%
No. 16	1.18	96.3	29.08%	60.77%	39.23%
No. 50	0.2978	99.2	29.96%	30.81%	69.19%
No. 100	0.15	23.1	6.98%	23.84%	76.16%
No. 200	0.075	14.8	4.47%	19.37%	80.63%
		64.13	19.37%	0.00%	100.00%

Fuente: elaboración propia

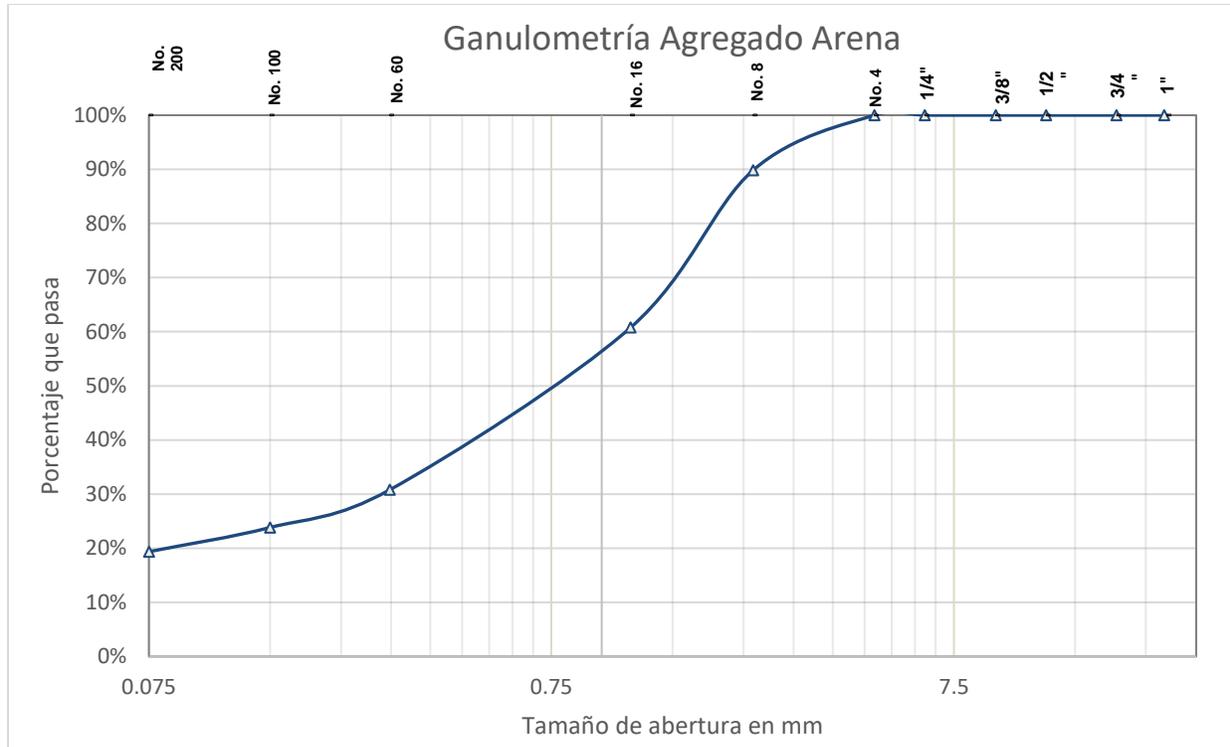


Figura 4.2.4. Granulometría agregado Arena

Fuente: Elaboración propia

Bajo las especificaciones de la normativa c se busca obtener una granulometría que cumpla para los parámetros de una mezcla D-4 de 3/4" de acuerdo con la designación ASTM D3515

Cuadro 4.2.5 Granulometría ASTM D3515

Sieve Size	Dense Mixtures								
	D-1	D-2	D-3	D-4	Mix Designation		D-7	D-8	D-9
	50 mm (2 in.)	37.5 mm (1½ in.)	25.0 mm (1 in.)	19.0 mm (¾ in.)	D-5 12.5 mm (½ in.)	D-6 9.5 mm (⅜ in.)	4.75 mm (No. 4) (Sand Asphalt)	2.36 mm (No. 8)	1.18 mm (No. 16) (Sheet Asphalt)
Grading of Total Aggregate (Coarse Plus Fine, Plus Filler if Required) Amounts Finer Than Each Laboratory Sieve (Square Opening), Weight %									
63-mm (2½ in.)	100	...	...	...	...	...	...	...	...
50-mm (2 in.)	90 to 100	100	...	...	...	...	...	...	...
37.5-mm (1½ in.)	...	90 to 100	100	...	...	...	...	...	...
25.0-mm (1 in.)	60 to 80	...	90 to 100	100	...	...	...	...	...
19.0-mm (¾ in.)	...	56 to 80	...	90 to 100	100	...	...	...	...
12.5-mm (½ in.)	35 to 65	...	56 to 80	...	90 to 100	100	...	...	...
9.5-mm (⅜ in.)	...	...	...	56 to 80	...	90 to 100	100	...	...
4.75-mm (No. 4)	17 to 47	23 to 53	29 to 59	35 to 65	44 to 74	55 to 85	80 to 100	...	100
2.36-mm (No. 8) ^A	10 to 36	15 to 41	19 to 45	23 to 49	28 to 58	32 to 67	65 to 100	...	95 to 100
1.18-mm (No. 16)	...	...	...	...	...	...	40 to 80	...	85 to 100
600-µm (No. 30)	...	...	...	...	...	...	25 to 65	...	70 to 95
300-µm (No. 50)	3 to 15	4 to 16	5 to 17	5 to 19	5 to 21	7 to 23	7 to 40	...	45 to 75
150-µm (No. 100)	...	...	...	...	...	...	3 to 20	...	20 to 40
75-µm (No. 200) ^B	0 to 5	0 to 6	1 to 7	2 to 8	2 to 10	2 to 10	2 to 10	...	9 to 20

Fuente: ASTM D3515

Con los puntos de control establecidos se determinó una combinación de agregados tratando de usar 3 diferentes en un inicio, pero se finalizó utilizando los 4 agregados en las proporciones 20% agregado con tamaño nominal de 3/4", 35% de agregado de tamaño nominal de 1/2", 15% de agregado con tamaño nominal de 3/8" y 30% de agregado arena, pues con esta combinación se obtiene una mezcla que satisface los puntos de control granulométricos establecidos en la norma ASTM D3515 de granulometría para una mezcla densa tipo D-4 con agregado nominal de 3/4" .

Cuadro 4.2.6 Combinación granulométrica

Material Agregado		3/4"		1/2"		3/8"		Arena		Mezcla propuesta	Puntos de control para T.N. 19 mm	
% Usado		20%		35%		15%		30%				
Malla	Abertura en mm	%Pasa	%Dosificación	%Pasa	%Dosificación	%Pasa	%Dosificación	%Pasa	%Dosificación			
2"	50.8	100		100		100		100	100	100.0		
1 1/2"	37.5	100		100		100		100	100	100.0		
1"	25	100	20.0	100	35.0	100	15	100	30	100.0		
3/4"	18.75	92.6	18.5	100	35.0	100	15	100	30	98.5	90	100
1/2"	12.5	27.0	5.4	94.79	33.2	100	15	100	30	83.6		
3/8"	9.375	11.9	2.4	83.03	29.1	91.11	13.7	100	30	75.1	56	80
1/4"	6.35	3.0	0.6	46.00	16.1	41.01	6.2	100	30	52.9		
No. 4	4.75	1.8	0.4	30.57	10.7	20.85	3.1	100	30	44.2	35	65
No. 8	2.36	0.5	0.1	5.79	2.0	1.33	0.2	89.85	27.0	29.3	23	49
No. 16	1.18	0.4	0.1	3.17	1.1	0.50	0.1	60.77	18.2	19.5		
No. 50	0.3	0.4	0.1	2.64	0.9	0.49	0.1	30.81	9.2	10.3	5	19
No. 100	0.15	0.4	0.1	2.50	0.9	0.48	0.1	23.84	7.2	8.2		
No. 200	0.075	0.4	0.1	2.36	0.8	0.47	0.1	19.37	5.8	6.8	2	8

Fuente: elaboración propia

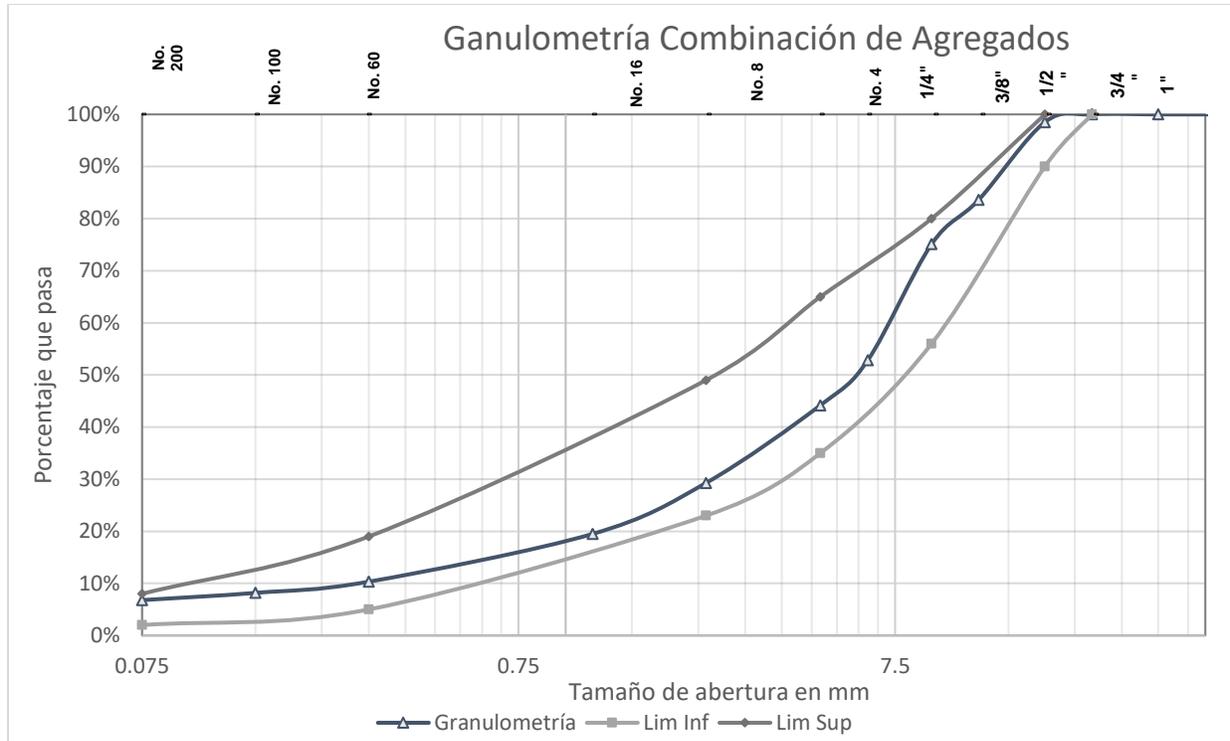


Figura 4.2.5. Granulometría Combinación de Agregados.

Fuente: Elaboración propia

Para la evaluación de las propiedades del agregado pétreo tanto grueso como fino se procedió a realizar la combinación de agregados en los porcentajes descritos anteriormente para proceder a separar los agregados por la malla no.4 y evaluar las propiedades de la parte gruesa y la parte fina por separado.

Cuadro 4.2.7 Propiedades de agregado grueso

Prueba	unidad	Designación	Valor Obtenido	Especificación
Desgaste de los ángeles	%	ASTM C131	8.2	30 máx.
Desgaste Microdeval	%	ASTM D 6928-06	10.05	18 máx.
Partículas planas y alargadas	%	ASTM D4791	1.01	40 máx.
Partículas trituradas	%	ASTMD5821 AMAAC RA	100	
Desprendimiento por fricción	%	08/2010	16	20 máx.
Densidad relativa, Gsb		ASTM C 127-07	2.831	2.4 mín.
Densidad específica, Gsa		ASTM C 127-07	2.904	
			12	15 máx. sulfato de sodio
Intemperismo acelerado	%	ASTM C88-90	15	20 máx. sulfato de magnesio

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 4.2.8 Propiedades de agregado fino

Prueba	unidad	Designación	Valor Obtenido	Especificación
Equivalente de arena	%	ASTM D2419	77.8	50 mín.
Azul de metileno	mg/g	M-MMP-4-04-014/09	15	15 máx.
Angularidad	%	AASHTO T 304-08	45.42	45 mín.
Densidad relativa		ASTM C128-07	2.88	2.4 mín.

Fuente: Elaboración propia



Figura 4.2.6. Ensayes desgaste microdeval y desgaste de los ángeles

Fuente: Elaboración propia



Figura 4.2.7. Ensayes Azul de metileno y equivalente de arena

Fuente: Elaboración propia

4.3 Elaboración y ensaye de mezcla asfáltica de control

Para la realización del diseño de mezcla asfáltica con el agregado y la granulometría seleccionada fue necesario determinar la curva de viscosidad-temperatura del asfalto para determinar el rango de temperaturas en las que es óptimo el mezclado y la compactación de la mezcla, con lo que se determina un

rango de 156-161°C para el mezclado y de 144-149°C para compactación.

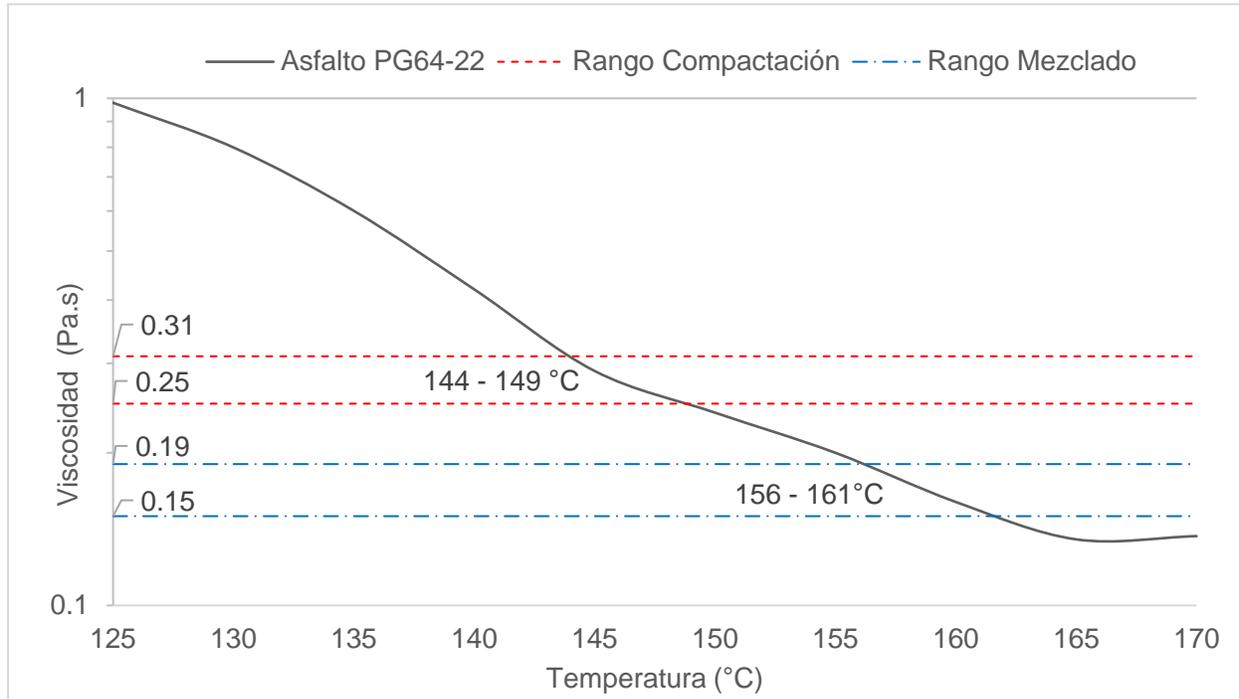


Figura 4.3.1. Curva de Viscosidad-Temperatura

Fuente: Elaboración propia

Con las características del agregado pétreo se calcula el contenido de asfalto inicial para la mezcla, de acuerdo a los índices asfálticos para el tipo de partícula dependiendo de su forma, en este caso se considera una partícula angulosa debido a que su origen es 100% de trituración, además de considerar el área superficial del agregado estimada de acuerdo a su tamaño correspondiendo a cada partícula dependiendo la malla que pase y en la que se retenga. Con los datos del cuadro 4.3.1 y el cuadro 4.3.2 se elige el índice asfáltico de 0.0075 para una partícula angulosa con 0-2.5 de absorción y las constantes de área superficial para cada tamaño de partícula, para que una vez que se ingrese la granulometría que se tiene multiplicar el índice asfáltico por el valor de superficie parcial del agregado de acuerdo a cada tamaño de agregado y así obtener el contenido mínimo requerido de asfalto.

Cuadro 4.3.1 Índices asfálticos

ÍNDICES ASFÁLTICOS			
	0.0 - 2.5 %	2.6 - 5.0%	MÁS DE 5.0 %
REDONDEADA	0.0055	0.0065	0.0075
SUB- ANGULOSA	0.0065	0.0075	0.0085
ANGULOSA	0.0075	0.0085	0.01

Cuadro 4.3.2 Área superficial de las partículas

ÁREAS SUPERFICIALES				
MATERIAL				CONSTANTE DE AREA SUPERFICIAL (m ² /Kg)
PASA MALLA		RETIENE MALLA		
37	(1 1/2")	19	(3/4")	0.27
19	(3/4")	4.75	(Núm. 4)	0.41
4.75	(Núm. 4)	0.425	(Núm. 40)	2.05
0.425	(Núm. 40)	0.075	(Núm. 200)	15.38
PASA		0.075	(Núm. 200)	53.3

Cuadro 4.3.3 Cálculo del contenido mínimo de asfalto

Forma del pétreo		ANGULOSA		ABSORCIÓN = 0.0 - 2.5 %		
Tamaños		%En Peso	Constante de área superficial	Superficie Parcial (m ² /Kg)	Índice Asfáltico (Kg/m ²)	Contenido Parcial (Kg/Kg)
Pasa	Retiene					
1"	3/4"	1.5	0.27	0.00398969	0.0075	0.00002992
3/4"	1/2"	14.9	0.41	0.06124671	0.0075	0.00045935
1/2"	3/8"	8.5	0.41	0.03477711	0.0075	0.00026083
3/8"	1/4"	22.3	0.41	0.09123093	0.0075	0.00068423
1/4"	No.4	8.7	0.41	0.03552738	0.0075	0.00026646
No.4	No.8	14.9	2.05	0.30569650	0.0075	0.00229272
No. 8	No. 16	9.77	2.05	0.20035627	0.0075	0.00150267
No. 16	No. 50	9.18	15.38	1.41138898	0.0075	0.01058542
No. 50	No.100	2.14	15.38	0.32969300	0.0075	0.00247270
No.100	No.200	1.39	15.38	0.21414970	0.0075	0.00160612
Pasa	No.200	6.79	53.3	3.61742565	0.0075	0.02713069
Totales		100.00		6.30548189		0.04729111

Se realizaron especímenes de prueba con diferentes masas de agregado para calibrar la altura de los especímenes lo más cercano a 63.5 mm, con la masa ajustada se procedió a el cálculo inverso de la granulometría en donde a partir de una masa inicial se calculen la aportación del retenido de cada malla de cada material, para con ello separar y conformar una mezcla de material con una masa conocida que cumpla con la curva granulométrica objetivo.

Cuadro 4.3.4 Cálculo Inverso de Granulometría

Material		3/4"	1/2"	3/8"	ARENA
% Usado		20%	35%	15%	30%
Malla	Abertura en mm	Dosificación (g)	Dosificación (g)	Dosificación (g)	Dosificación (g)
2"	50.8				
1 1/2"	37.5				
1"	25				
3/4"	18.75	17.8			
1/2"	12.5	157.8	21.9		
3/8"	9.375	36.5	49.5	16.0	
1/4"	6.35	21.4	155.9	90.4	
No. 4	4.75	2.9	64.9	36.4	
No. 8	2.36	3.2	104.3	35.2	36.6
No. 16	1.18	0.1	11.0	1.5	104.9
No. 50	0.3	0.0	2.2	0.0	108.1
No. 100	0.15	0.0	0.6	0.0	25.2
No. 200	0.075	0.0	0.6	0.0	16.1
Pasa 200		1.0	9.9	0.9	69.9
Suma		240.6	421.0	180.4	360.9
				Suma pétreo	1202.89

Fuente: Elaboración propia

Una vez separando el material seco por la granulometría requerida en las proporciones necesarias en diferentes contenedores se procede a llevar el material pétreo al horno a la temperatura que indica el límite superior para lograr el mezclado a 160°C durante un periodo aproximado de un par de horas para así salvaguardar que exista homogeneidad en la temperatura de todo el agregado, además también se introduce el asfalto necesario a calentar a la temperatura de mezclado. Una vez teniendo el material a la temperatura necesaria se somete a mezclado manual

realizando tres probetas por cada contenido objetivo, a través del método ASTM D6926-04, inicialmente se realizaron los contenidos de asfalto respecto al agregado pétreo (CRA) 4.5%, 5.0%, 5.5% y 6.0%. arrojando resultados poco satisfactorios en cuestión de flujo Marshall, se decide adicionalmente realizar un espécimen de 3.5% y 4.0% de CRA.

Una vez terminados los especímenes para el diseño de mezcla asfáltica de base se procede a después de 1 día pesar los especímenes al aire, sumergidos y bajo la condición de saturado superficialmente seco, con estos valores se procede a el cálculo de las proporciones en volumen de a mezcla, cálculo de vacíos del agregado mineral (VAM), vacíos de aire y vacíos llenos de asfalto VFA, presentes en el cuadro 4.3.3 todos estos parámetros se calculan con la obtención previa de la densidad del cuerpo de ingenieros (DCI) en el cuadro 4.3.2, obteniendo una densidad de 2.795 por último se realiza el ensaye de las pastillas en la prensa Marshall mediante el método ASTM D6927.

Cuadro 4.3. Ensaye Densidad del Cuerpo de Ingenieros DCI

Ensayo	
Masa de bote+ varilla en aire (Wbv)	461.6
Masa de bote+ varilla en agua (W'bv)	401.1
Masa del bote + Varilla + C. asf. en aire (Wc)	3105.4
Masa del bote + Varilla + C. asf. en agua (W'c)	488.3
masa del cemento asfáltico (Wa)	2643.8
Fórmula:	$\frac{Wa}{Wa - (W'c - W'bv)}$ 1.034
Del material pétreo	
Masa del material pétreo seco (Wm)	1501.3
Masa del bote + varilla + C. asf + M. en aire (Wcm)	4606.7
Masa del bote + varilla + C. asf + M. en agua (W'cm)	1452.4
Fórmula:	$\frac{Wm}{(Wcm - W'cm) - (Wc - W'c)}$ 2.795
Masa del material pétreo seco (Wm)	1501.3
Masa del bote + varilla + C. asf. en agua (W'c)	488.3
Masa del bote + varilla + Mater. en agua (W'cm)	1452.4
Fórmula:	$\frac{Wm}{Wm - (W'cm - W'c)}$ 2.795

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 4.3.6 Volumetría de especímenes Marshall

No. Pastilla	Contenido de asfalto %		Gravedad específica de la mezcla compactada				Proporciones en Volumen						Flujo (mm)	Altura (mm)	
	Peso de la Mezcla	Peso del Agregado	Masa en aire (g)	Masa SSS (g)	Masa en agua (g)	Volumen (cm ³)	Peso Vol. (Gmb)	Cemento Asfáltico (%)	Agregado Pétreo (%)	Vacíos de aire (%)	VAM (%)	VFA (%)			Estabilidad corregida (kN)
3.5_1	3.38	3.50	1227.6	1245.7	744.7	501.0	2.450	8.0	84.70	7.28	15.3	52.4	11.760	2.39	66.35
4.0_1	3.85	4.00	1238.8	1246.2	742.9	503.3	2.461	9.2	84.68	6.17	15.3	59.7	14.610	4.15	64.435
4.5_1	4.31	4.50	1254.1	1259.8	753.0	506.8	2.475	10.3	84.72	4.97	15.3	67.5	12.682	4.70	65.16
4.5_2	4.31	4.50	1269.7	1273.4	766.0	507.4	2.502	10.4	85.67	3.90	14.3	72.7	13.747	5.08	65.17
4.5_3	4.31	4.50	1269.7	1273.4	766.0	507.4	2.502	10.4	85.67	3.90	14.3	72.7	13.093	3.77	65.17
5.0_1	4.76	5.00	1214.7	1217.8	730.8	487.0	2.494	11.5	84.99	3.52	15.0	76.5	11.931	6.37	62.4
5.0_2	4.76	5.00	1266.0	1269.8	756.8	513.0	2.468	11.4	84.09	4.54	15.9	71.4	11.686	5.26	65.49
5.0_3	4.76	5.00	1251.5	1254.3	749.7	504.6	2.480	11.4	84.51	4.07	15.5	73.7	12.803	4.02	64.87
5.5_1	5.21	5.50	1218.3	1220.7	736.2	484.5	2.515	12.7	85.28	2.05	14.7	86.1	10.166	3.14	61.93
5.5_2	5.21	5.50	1251.8	1255.0	746.1	508.9	2.460	12.4	83.42	4.18	16.6	74.8	9.726	6.15	64.96
5.5_3	5.21	5.50	1270.5	1273.7	762.8	510.9	2.487	12.5	84.33	3.13	15.7	80.0	9.154	3.30	65.49
6.0_1	5.66	6.00	1240.2	1248.3	737.9	510.4	2.430	13.3	82.02	4.68	18.0	74.0	7.602	7.96	66.44
6.0_2	5.66	6.00	1265.6	1267.1	760.3	506.8	2.497	13.7	84.29	2.04	15.7	87.0	9.403	6.76	65.61
6.0_3	5.66	6.00	1276.3	1278.0	774.8	503.2	2.536	13.9	85.61	0.51	14.4	96.5	9.637	5.69	63.95

Fuente: Elaboración propia

Para poder determinar contenido óptimo de asfalto para el diseño Marshall se realizan las gráficas de contenido de cemento asfáltico respecto al agregado (CRA) contra Vacíos (Va) en figura 4.3.2, Vacíos del agregado mineral (VAM) figura 4.3.3, Vacíos llenos de asfalto (VFA) en figura 4.3.4, Estabilidad figura 4.3.5, Flujo figura 4.3.6 y Peso Volumétrico Específico en figura 4.3.7, en donde se determina un contenido de ligante asfáltico óptimo de 4.5% respecto al agregado pétreo, a pesar de no cumplir estrictamente con las solicitudes de flujo, las gráficas correspondientes a los ensayos Marshall de cada pastilla se muestran en el anexo 1.

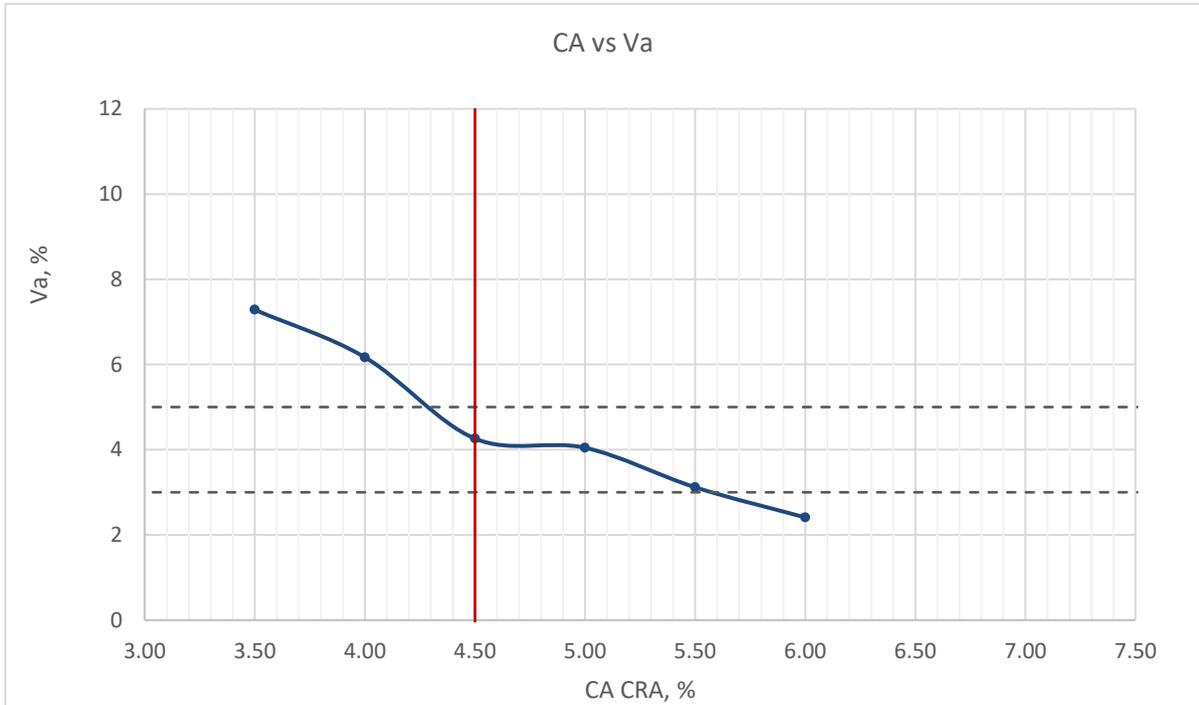


Figura 4.3.2. Contenido de asfalto respecto al pétreo contra vacíos en la mezcla

Fuente: Elaboración propia

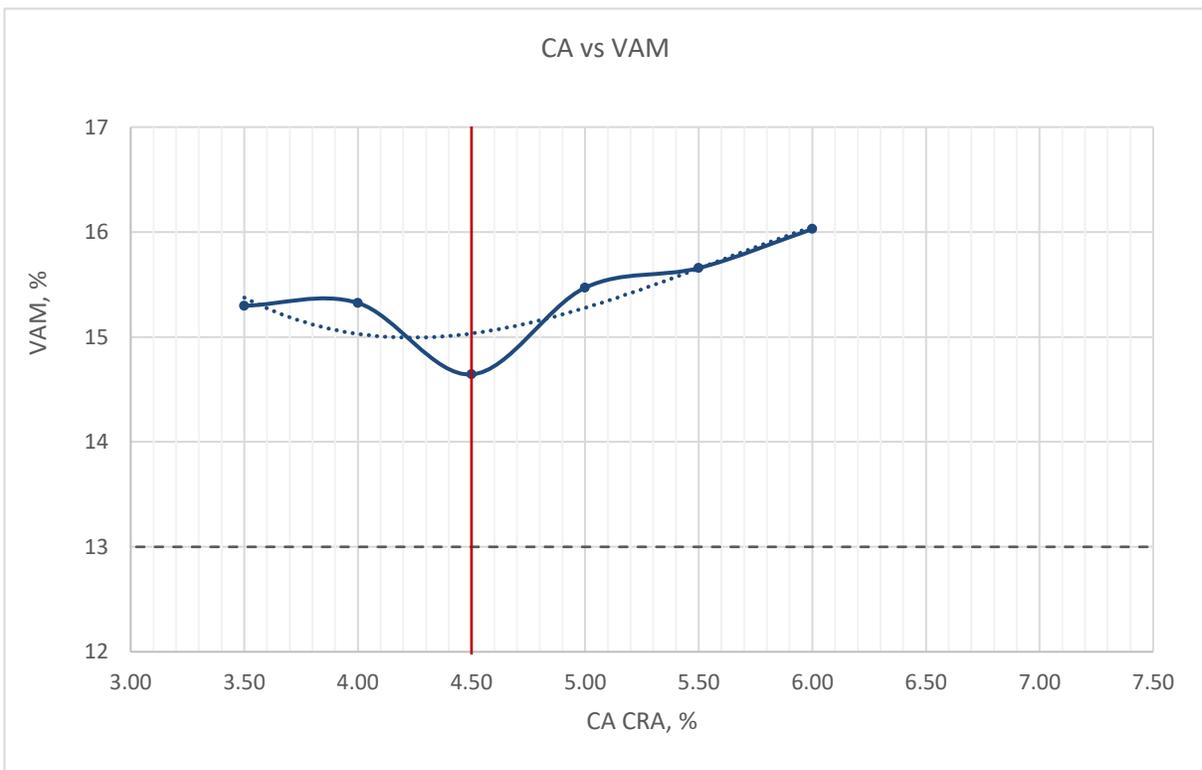


Figura 4.3.3. Contenido de asfalto respecto al pétreo contra vacíos en el agregado mineral

Fuente: Elaboración propia

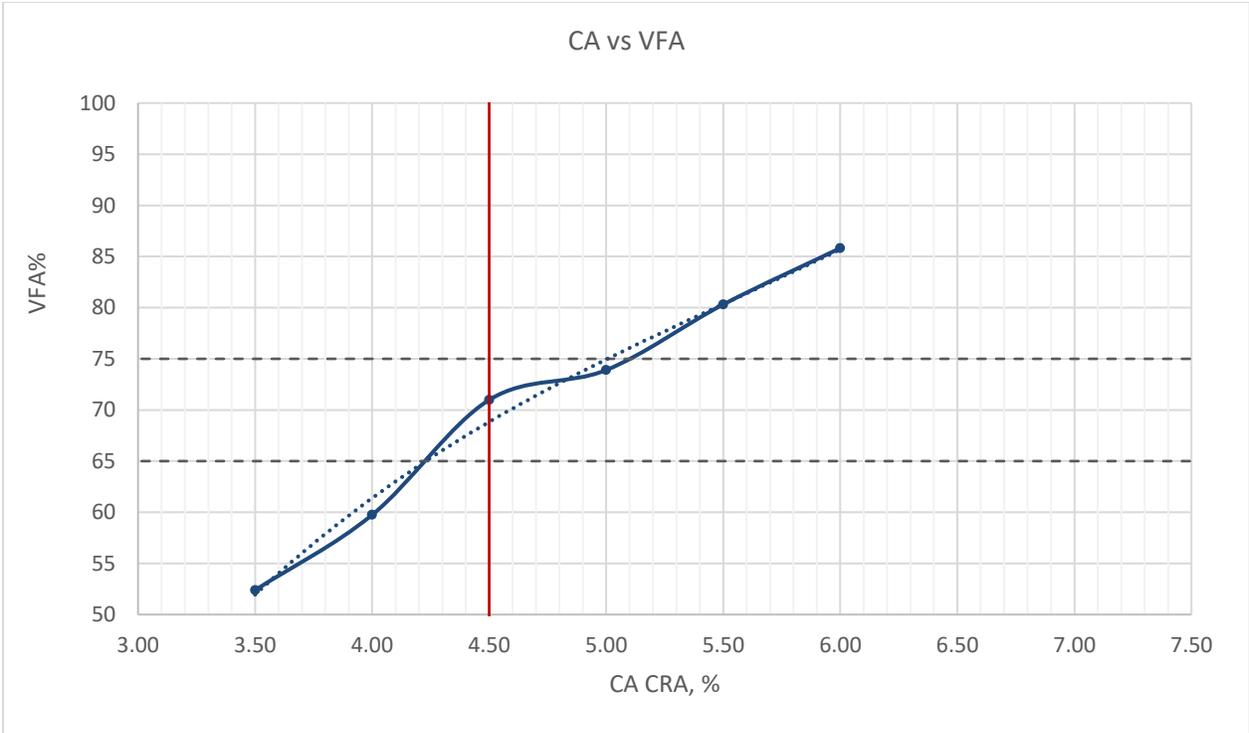


Figura 4.3.4. Contenido de asfalto respecto al pétreo contra vacíos llenos de asfalto

Fuente: Elaboración propia

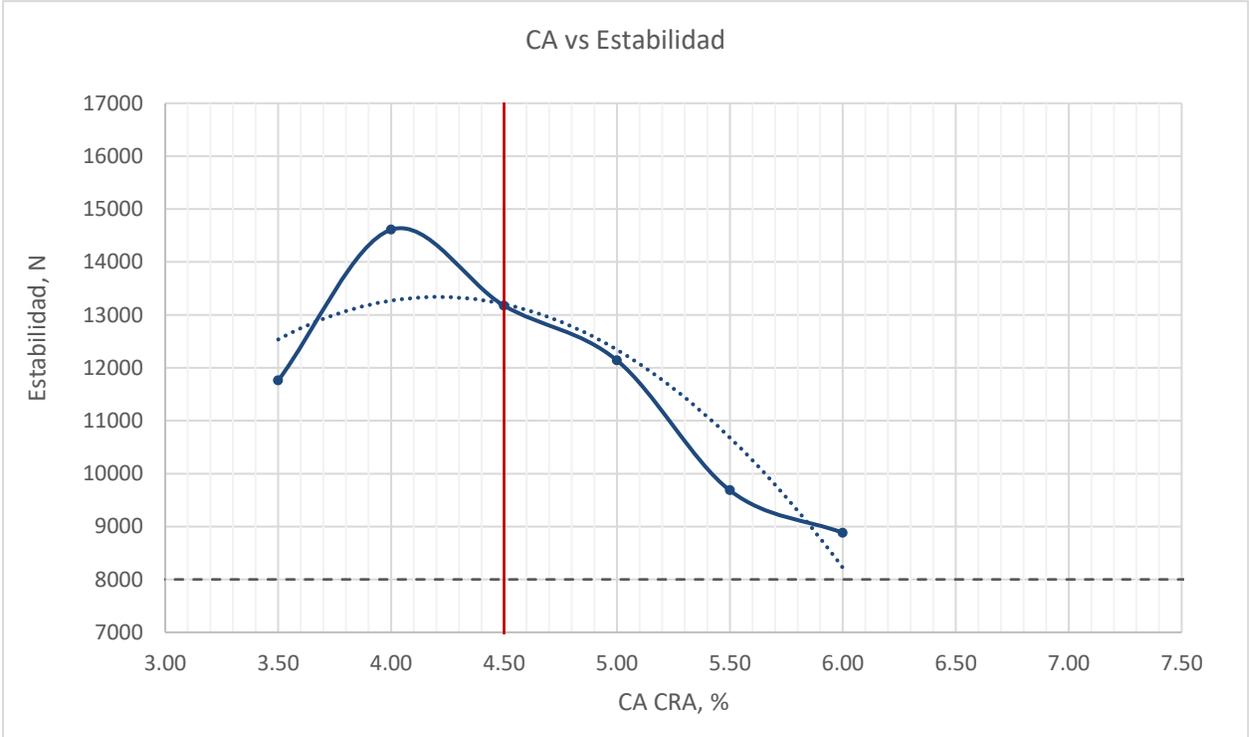


Figura 4.3.5. Contenido de asfalto respecto al pétreo contra estabilidad

Fuente: Elaboración propia

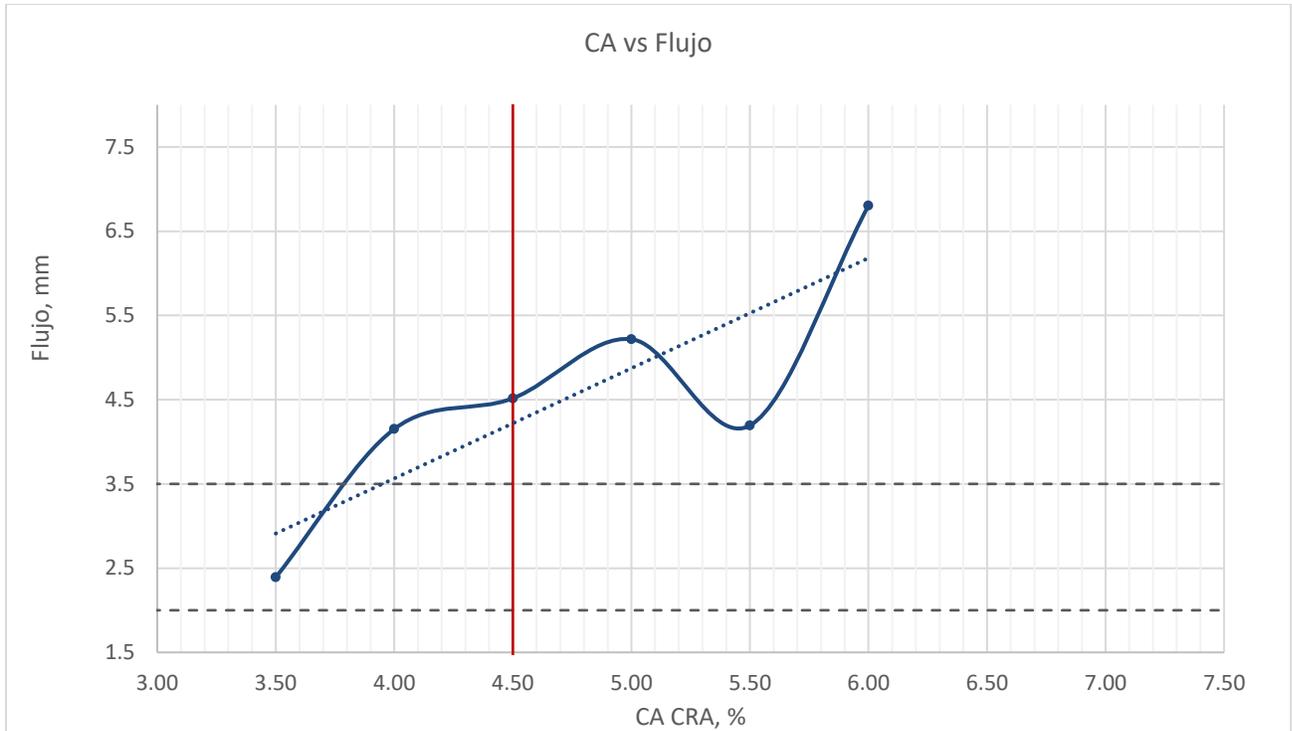


Figura 4.3.6 Contenido de asfalto respecto al pétreo contra flujo
 Fuente: Elaboración propia

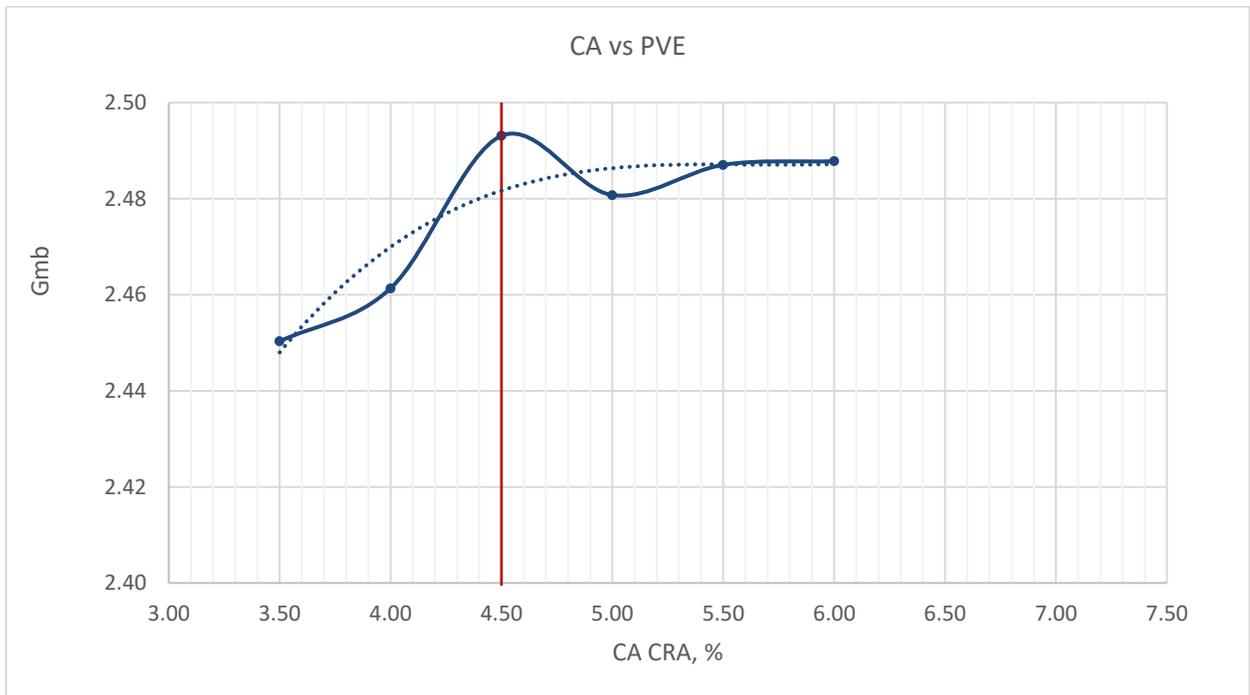


Figura 4.3.7 Contenido de asfalto respecto al pétreo contra peso volumétrico
 Fuente: Elaboración propia

De esta manera, la mezcla de referencia está compuesta por un 4.5% de contenido de asfalto en relación con el agregado pétreo, presentando un peso volumétrico de 2.493 g/cm³. Los vacíos se encuentran cerca del punto medio de las especificaciones, registrando un 4.26%. La mezcla exhibe un VAM del 14.64%, VFA del 70.98%, una estabilidad de 1343.27 Kg y un flujo de 4.52. Aunque estos valores no son óptimos para efectos de diseño, se contempla su utilización dado que la mezcla presenta valores elevados de flujo, por lo que se busca evaluar si hay alguna mejora al introducir residuos plásticos.

Cuadro 4.3.7 Propiedades de mezcla de control

Contenido de asfalto %	Peso Vol. (g/cm ³)	Vacíos de aire %	VAM %	VFA %	Estabilidad corregida Kg	Flujo mm
4.5	2.493	4.26	14.64	70.98	1,344.27	4.52

Fuente: Elaboración propia



Figura 4.3.8 Especímenes de diseño finalizados

Fuente: Elaboración propia



Figura 4.3.9 Ensayo de especímenes de diseño
Fuente: Elaboración propia



Figura 4.3.10 Especímenes de diseño ensayados
Fuente: Elaboración propia

4.4 Elaboración y ensaye de mezclas asfálticas adicionadas con residuos plásticos

Para la elaboración de mezclas asfálticas con residuos plásticos se realizaron especímenes de prueba para determinar la cantidad de agregado pétreo necesario, combinado con plástico para ajustar la altura del espécimen a la adecuada de 63.5 mm. Una vez determinado el contenido de asfalto óptimo que fue de 4.5 % respecto al agregado pétreo se procede a reducirlo en un 10% teniendo así que utilizar 4.05% de asfalto respecto al agregado, y se calculan los pesos de cada material necesarios para lograr esta combinación en cuadro 4.4.1, como se muestra en la figura 4.4.1 con ello se procede a realizar los 3 especímenes para cada contenido de plástico reciclado del 6, 8, 10 al 12% en peso respecto al agregado, esto para cada plástico a sustituir.

Para incorporar los residuos plásticos en la mezcla asfáltica se consideró trabajar en los límites superiores de las temperaturas de mezclado y compactación siendo estos 160°C para mezclado (figura 4.4.3) y 149°C para compactación, en el caso de LDPE, por otro lado para el caso del PP se mezcló a 160°C y se buscó compactar por encima del límite superior de compactación debido a que si bien no se busca incorporar el PP por completo en la mezcla se obtiene una mejor trabajabilidad de la mezcla al momento de compactar, debido a que los plásticos al ser poco densos ocupan gran parte del volumen de la mezcla. En todos los casos previo a la compactación se realizó un curado de al menos 2 horas en el horno a la temperatura de la compactación (figura 4.4.4)

Una vez que se tuvieron los especímenes compactados se dejan enfriar a temperatura ambiente por un día para después de medirlos y pesados sumergirlos en agua condicionada a 60°C durante un período de 30 minutos para su posterior ensayo en la prensa Marshall, se pudo observar un incremento considerable en la estabilidad de las mezclas que han sido adicionadas con plástico y en el caso de LDPE un aumento en la deformación de los especímenes a mayor contenido de plástico,, mientras que en el PP se observa un decremento en la deformación, a

mayor contenido de plástico.



Figura 4.4.1 Separación y pesada de agregados para lograr granulometría
Fuente: Elaboración propia



Figura 4.4.2 Comprobación de peso granulometría
Fuente: Elaboración propia



Figura 4.4.3 Mezclado de agregado pétreo, asfalto y residuo plástico
Fuente: Elaboración propia



Figura 4.4.4 Identificación de mezcla para curado en horno
Fuente: Elaboración propia



Figura 4.4.5 Especímenes terminados después de compactación
Fuente: Elaboración propia

Cuadro 4.4.1 Pesos de combinaciones ajustadas

Especímen	%ARP Reducido en un 10%	Pétreo (g)	Asfalto (g)	Plástico adicionado (g)				Peso total (g)
				6%	8%	10%	12%	
1,2,3	4.05	1090.7	44.17	65.4				1200.36
4,5,6	4.05	1017.7	41.22		81.4			1140.37
7,8,9	4.05	953.9	38.63			95.4		1087.96
10,11,12	4.05	897.7	36.36				107.7	1041.73

Fuente: Elaboración propia

En el cuadro 4.4.2. se muestra un resumen de los resultados obtenidos en especímenes elaborados con LDPE.

Cuadro 4.4.2 Resumen de resultados especímenes adicionados con LDPE

Especímen LDPE	Estabilidad (kN)	Promedio (kN)	Flujo (mm)	Promedio (mm)
6.1	32.80		6.24	
6.2	28.88	28.53	4.33	5.49
6.3	23.89		5.90	
8.1	33.64		6.05	
8.2	31.15	32.39	6.14	6.10
8.3	32.37		6.11	
10.1	32.21		6.27	
10.2	32.79	32.72	7.37	6.87
10.3	33.16		6.98	
12.1	39.69		7.03	
12.2	35.99	40.76	7.16	6.92
12.3	46.59		6.58	

Fuente: Elaboración propia

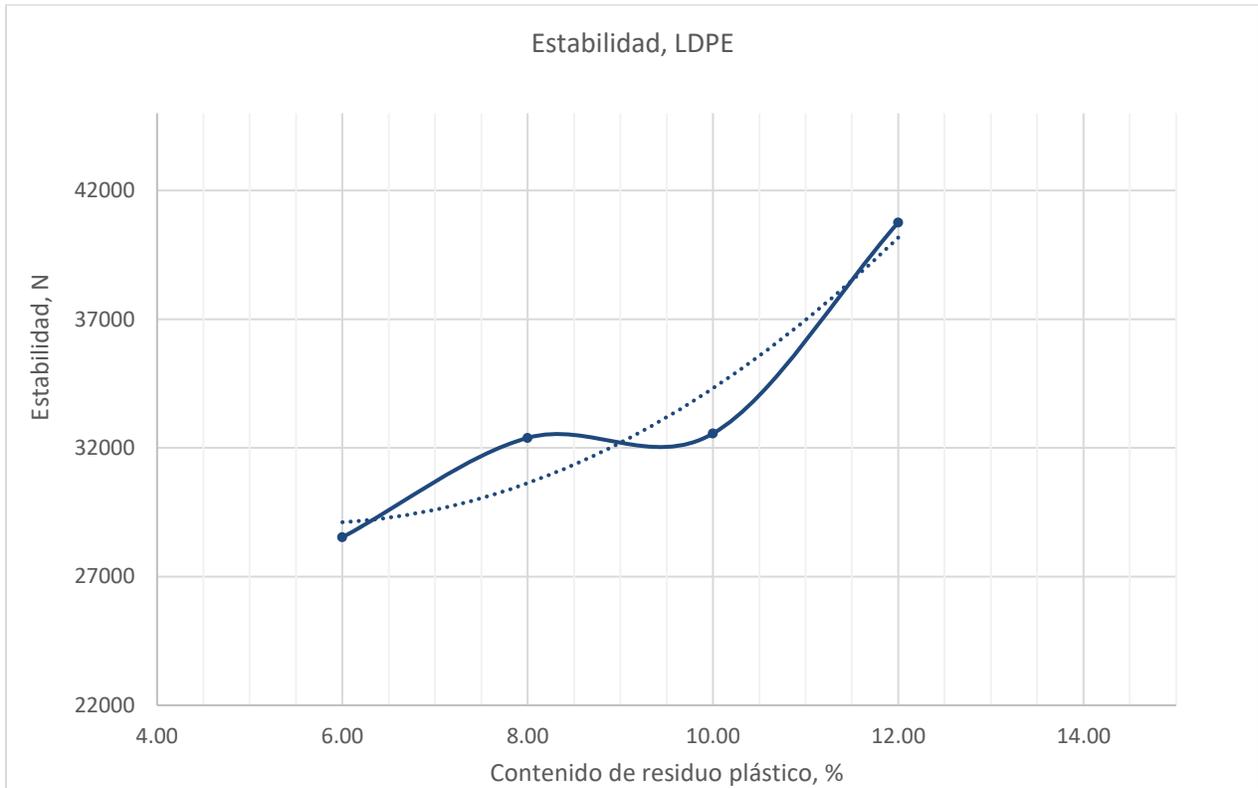


Figura 4.4.6 Contenido de Residuo plástico contra estabilidad, LDPE

Fuente: Elaboración propia

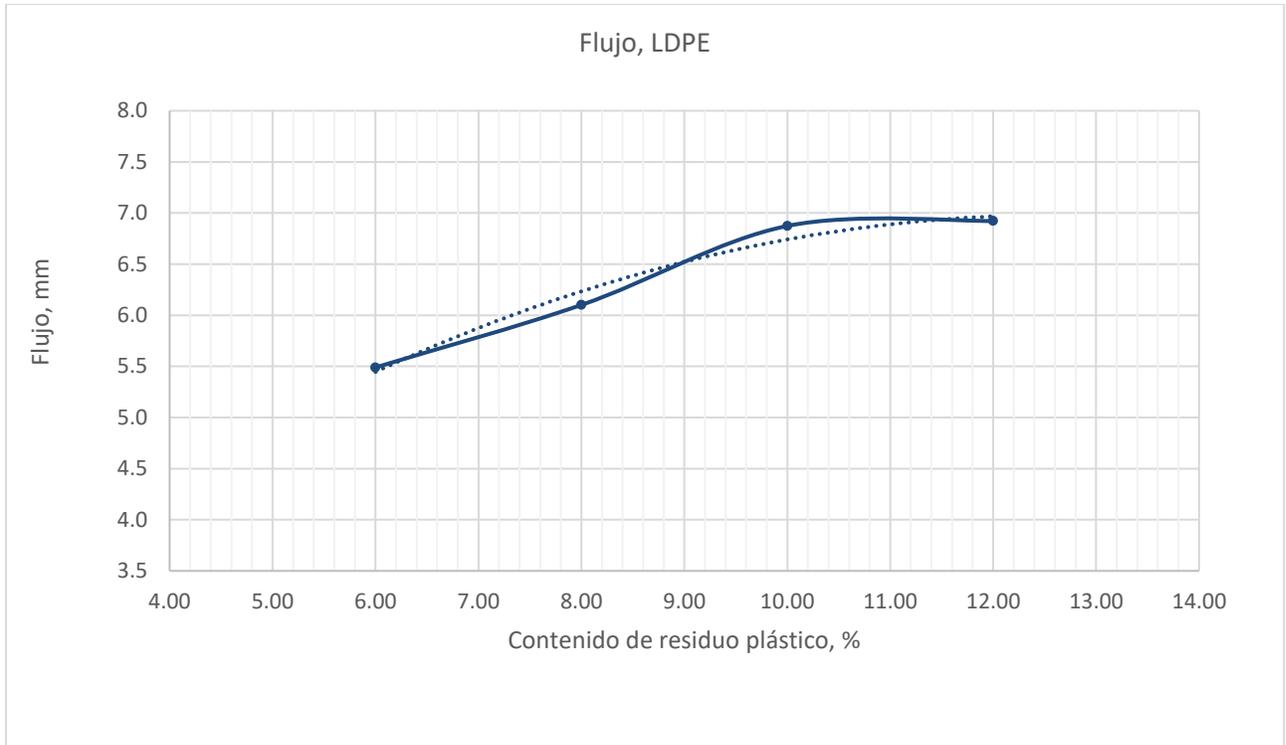


Figura 4.4.7 Contenido de Residuo plástico contra flujo, LDPE
 Fuente: Elaboración propia

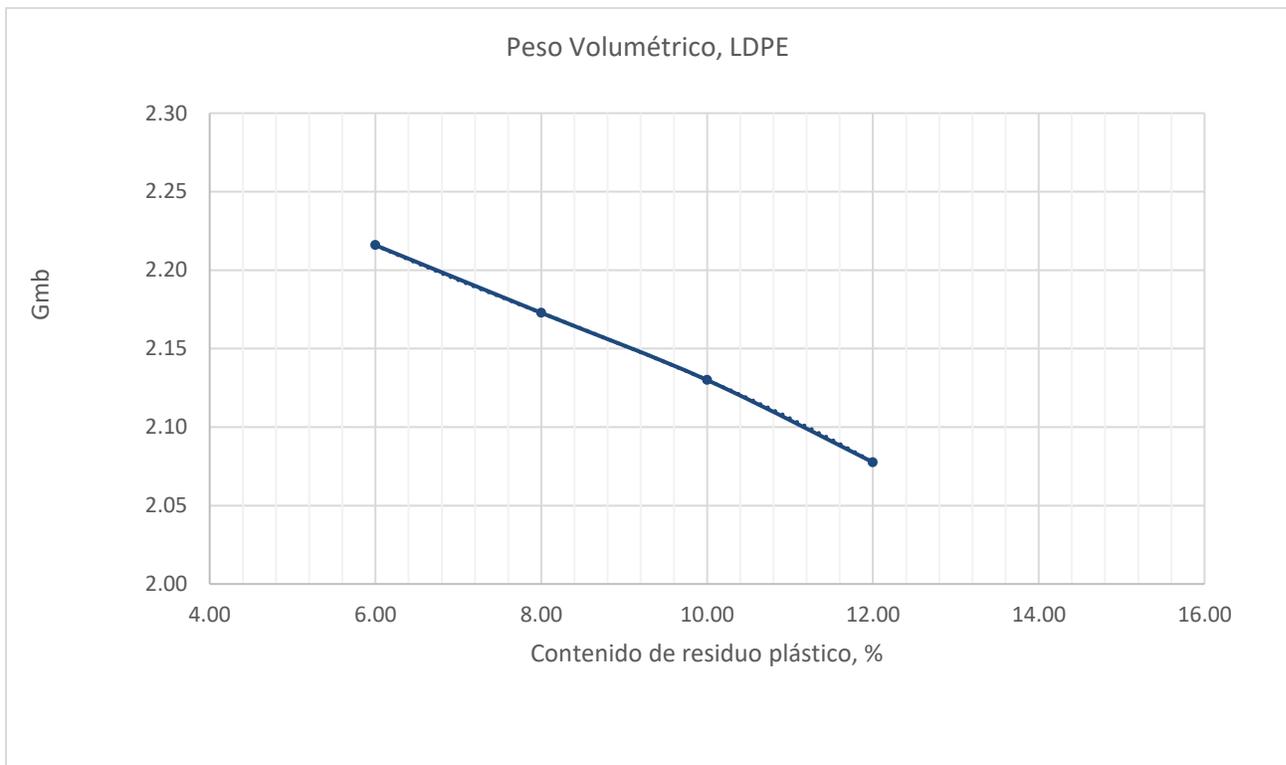


Figura 4.4.8. Contenido de Residuo plástico contra Peso Volumétrico, LDPE
 Fuente: Elaboración propia

El PP por su lado incrementa considerablemente su estabilidad en promedio, logrando una tendencia al alza, mientras que en el flujo se refleja una tendencia a la baja, salvo en el último espécimen, donde se comienza a notar rigidización en la mezcla, el cuadro 4.4.3. resume los resultados de los especímenes elaborados con PP.

Cuadro 4.4.3 Resumen de resultados especímenes adicionados con PP

Especimen PP	Estabilidad (kN)	Promedio (kN)	Flujo (mm)	Promedio (mm)
6.1	20.21		7.88	
6.2	17.90	20.98	6.96	7.62
6.3	24.82		8.01	
8.1	23.03		8.30	
8.2	29.65	27.04	7.10	7.83
8.3	28.44		8.09	
10.1	50.98		4.12	
10.2	27.93	36.63	4.41	4.26
10.3	30.97		4.26	
12.1	36.90		5.15	
12.2	35.45	40.37	6.72	4.48
12.3	48.75		1.58	

Fuente: Elaboración propia

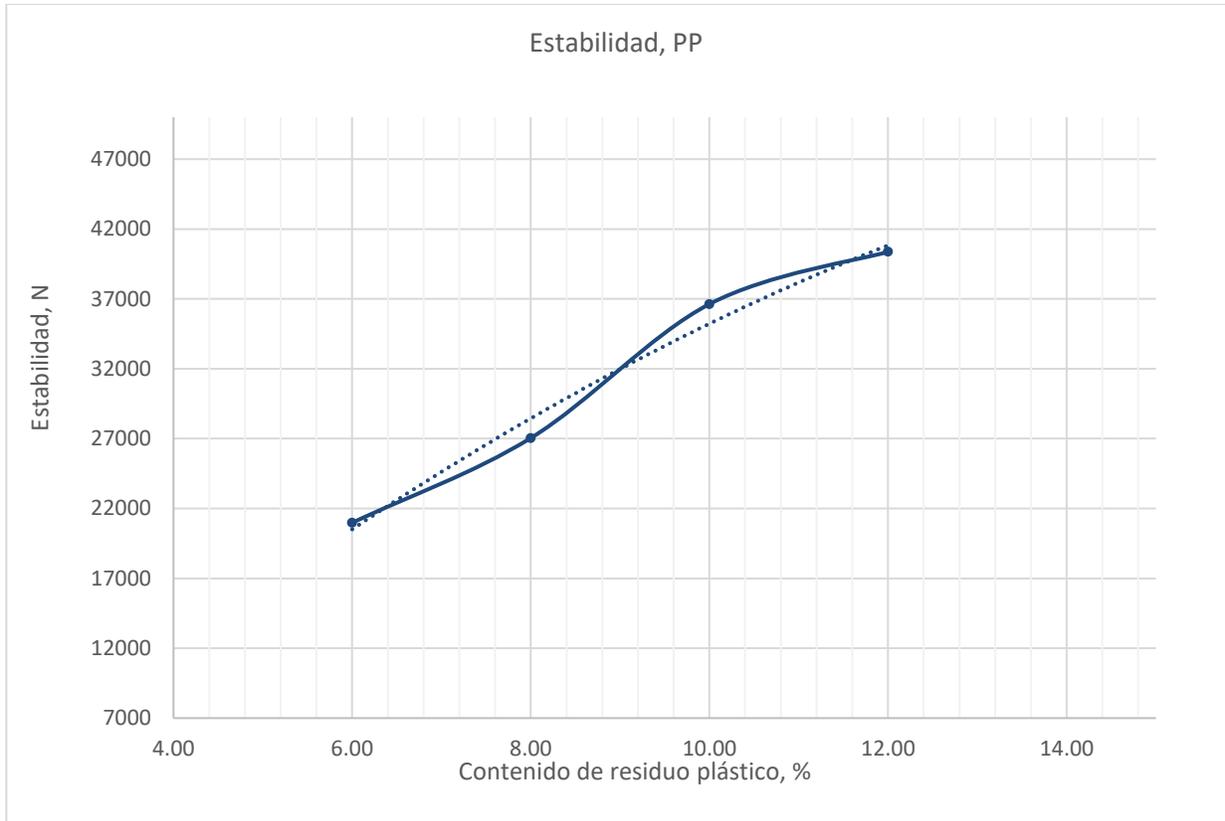


Figura 4.4.9 Contenido de Residuo plástico contra estabilidad, PP
 Fuente: Elaboración propia

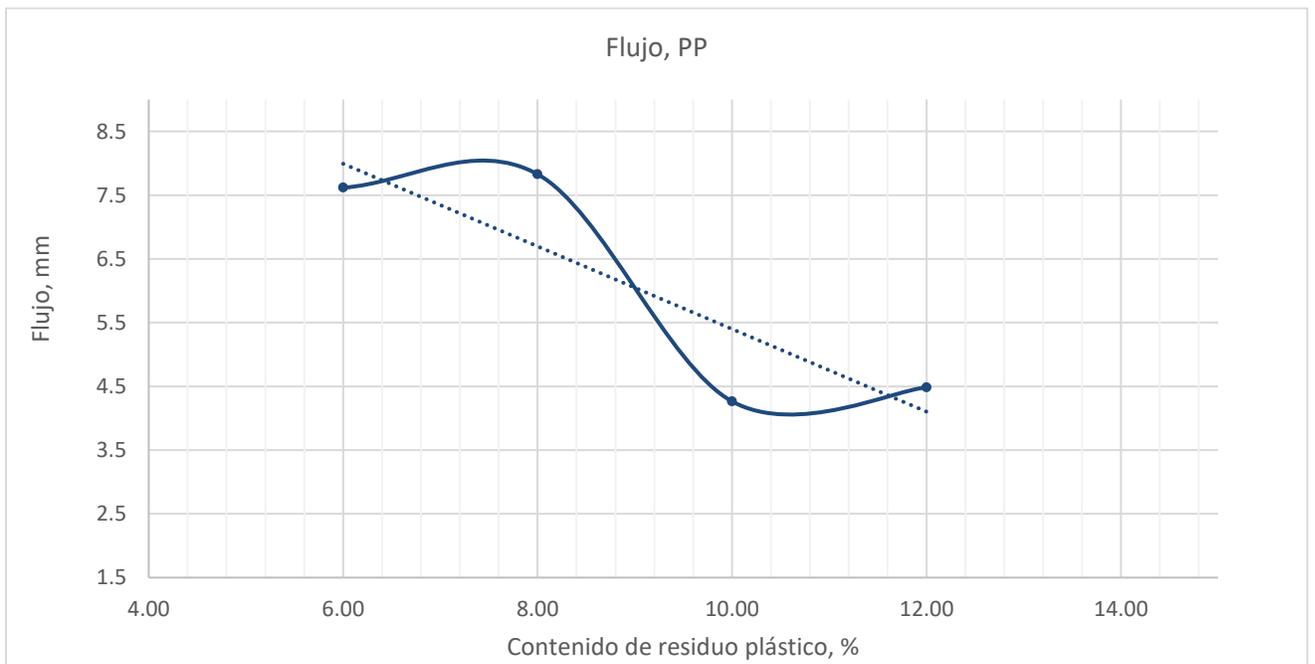


Figura 4.4.10 Contenido de Residuo plástico contra flujo, PP
 Fuente: Elaboración propia

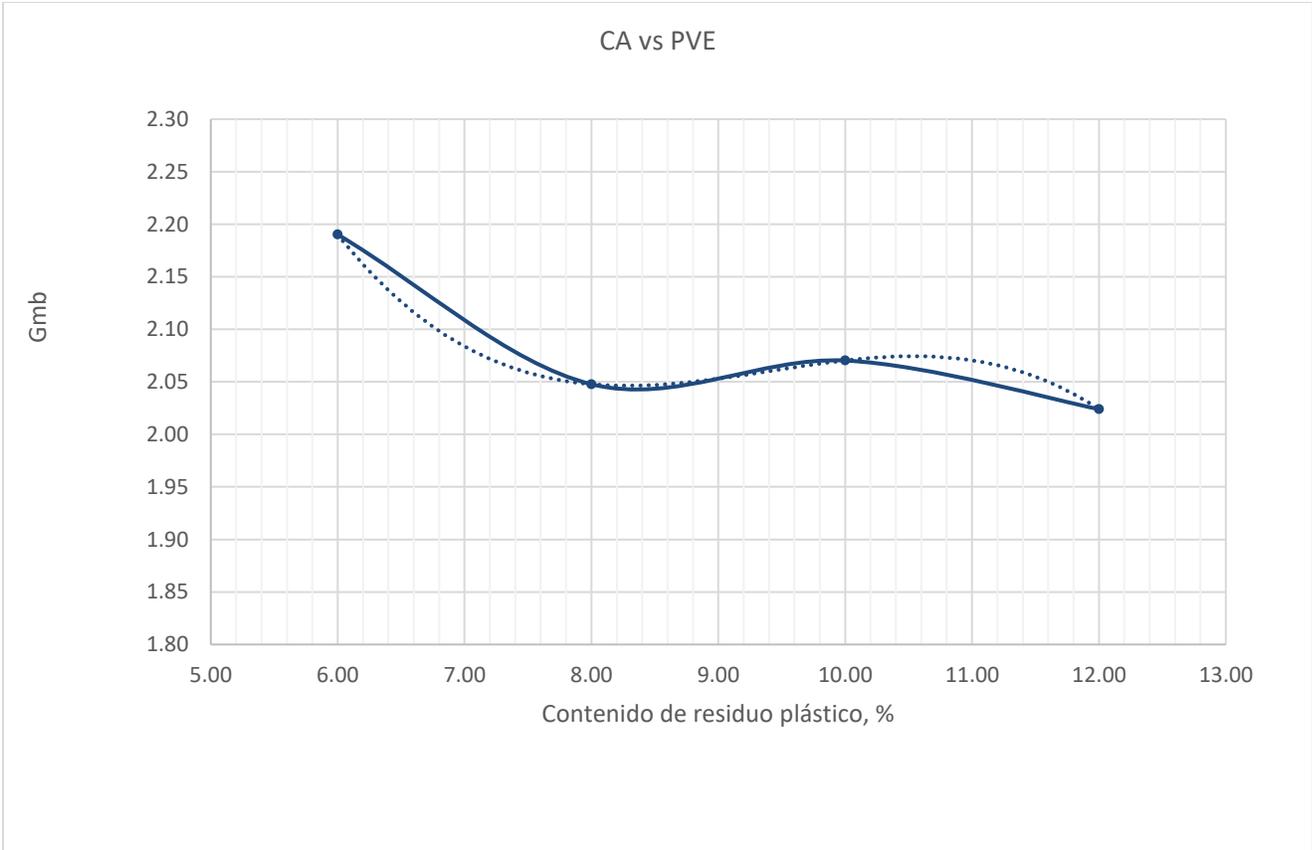


Figura 4.4.11. Contenido de Residuo plástico contra Peso Volumétrico, PP
Fuente: Elaboración propia



Figura 4.4.12. Mezclado de agregado, asfalto y residuos plásticos
Fuente: Elaboración propia



Figura 4.4.13. Especimen elaborado con LDPE

Fuente: Elaboración propia



Figura 4.4.14. Espécimen elaborado con PP

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que ambos materiales presentan una tendencia al incremento de estabilidad a medida que se incorporan residuos plásticos, logrando un equilibrio al agregar 9% de residuo plástico independientemente de cuál sea el que se agregue, de igual manera los valores de estabilidad son muy similares a medida que se agrega más del 10% de residuos plásticos (4.4.15) mientras que el lujo muestra incrementar mientras se agrega LDPE y disminuir cuando el residuo plástico incorporado es PP (4.4.16)

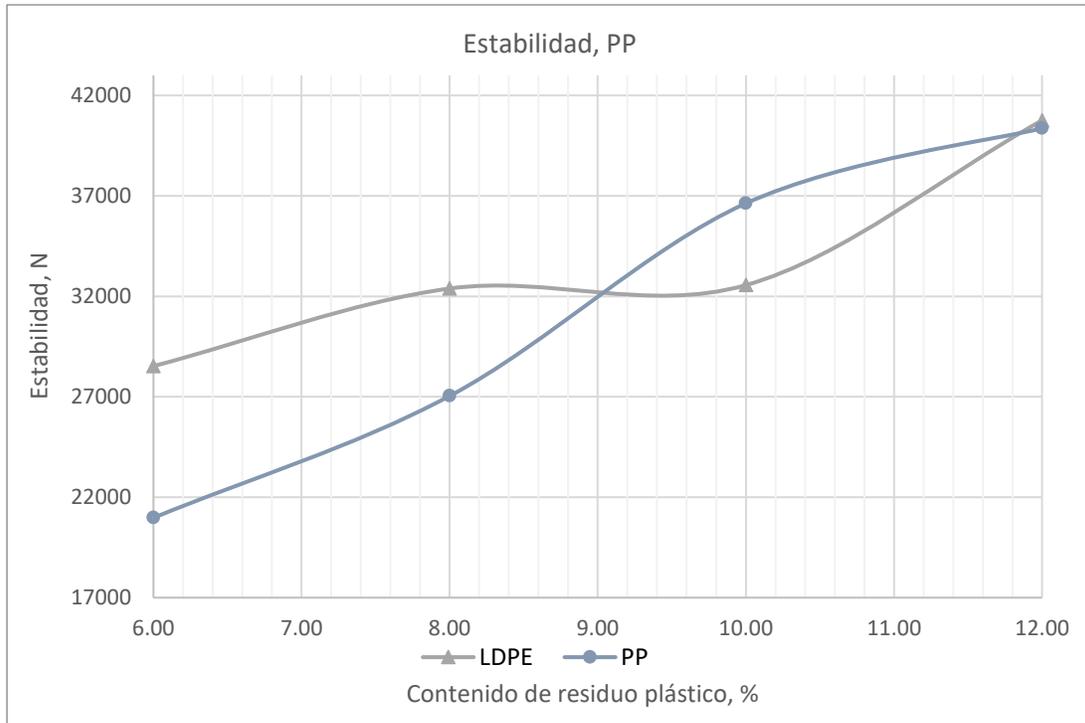


Figura 4.4.15 Contenido de Residuo plástico contra estabilidad, LDPE y PP
 Fuente: Elaboración propia

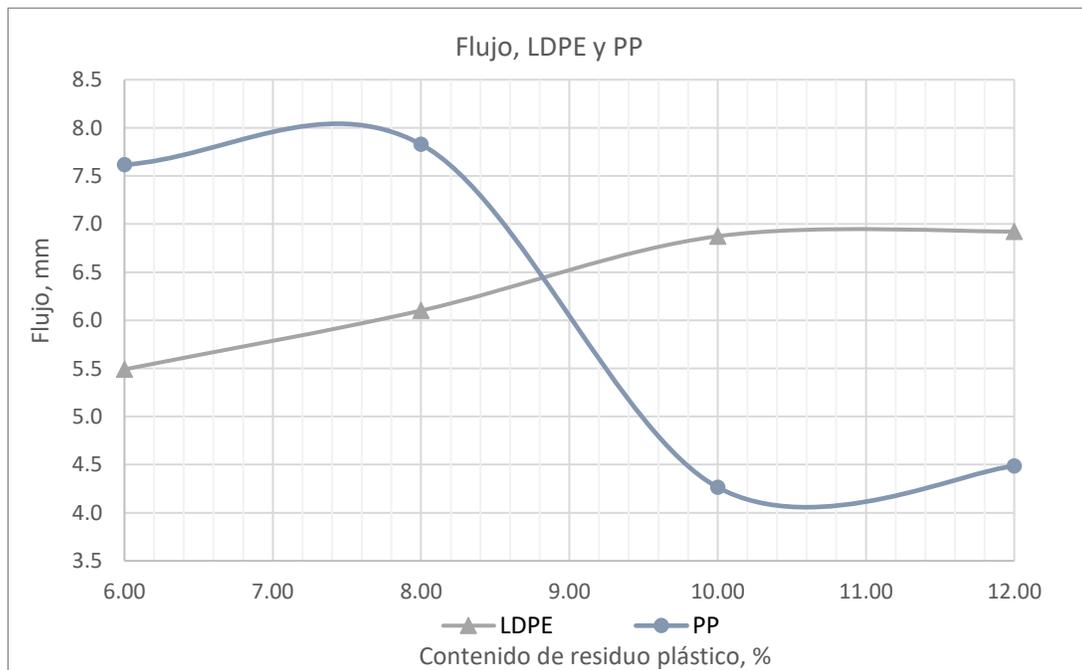


Figura 4.4.16 Contenido de Residuo plástico contra flujo, LDPE y PP
 Fuente: Elaboración propia

4.5 Especímenes con residuos plásticos combinados

Cuadro 4.5.1 Resumen de resultados especímenes adicionados con PP y LDPE

LDPE y PP	Estabilidad (kN)	Promedio (kN)	Flujo (mm)	Promedio (mm)
40L60P-1	18.80		5.37	
40L60P-2	28.12	27.91	6.49	6.03
40L60P-3	36.82		6.23	
50L50P-2	24.35		6.71	
50L50P-2	25.63	24.96	5.93	6.35
50L50P-3	24.90		6.39	
60L40P-1	41.40		4.92	
60L40P-2	25.44	32.68	5.92	5.64
60L40P-3	31.21		6.10	

Fuente: Elaboración propia

Derivado de la selección del porcentaje que presenta un mejor comportamiento entre la adición de LPDE y PP se opta por elaborar especímenes con la combinación de ambos residuos plásticos en un 10% respecto al agregado pétreo variando la proporción de cada tipo de residuo respecto al total que se necesita incorporar.

En términos de estabilidad, cuando predomina el PP se reportan valores si bien mayores a los de la mezcla de control resultan ser los más bajos que se obtienen al combinar los residuos plásticos, con lo que se encuentran los valores más altos de estabilidad cuando predomina el LDPE en 60% contra 40% de PP respecto al 10% agregado en la mezcla. (tabla 4.5.1)

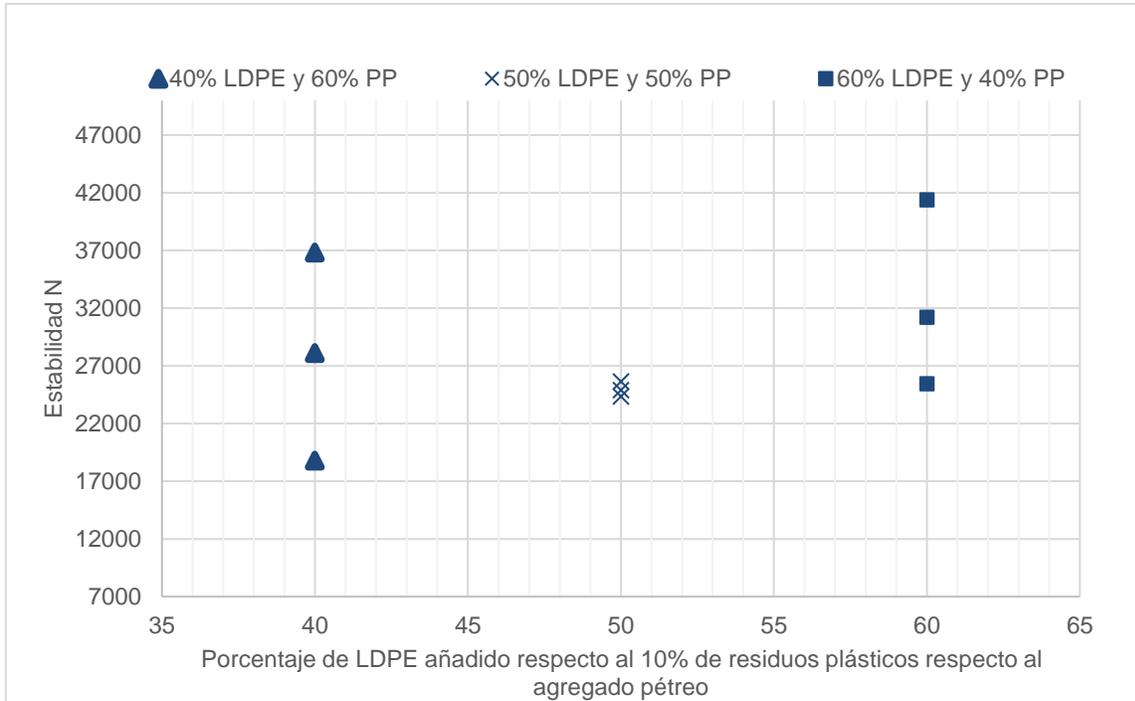


Figura 4.5.1 Contenido de Residuo plástico contra flujo, LDPE y PP Combinados
 Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 4.5.2 se observa como en términos de estabilidad se tiene una tendencia curva en donde al tratarse de deformación se requiere la más baja, la cual se consigue también con la combinación 60LDPE 40PP, siendo esta mezcla la más adecuada.

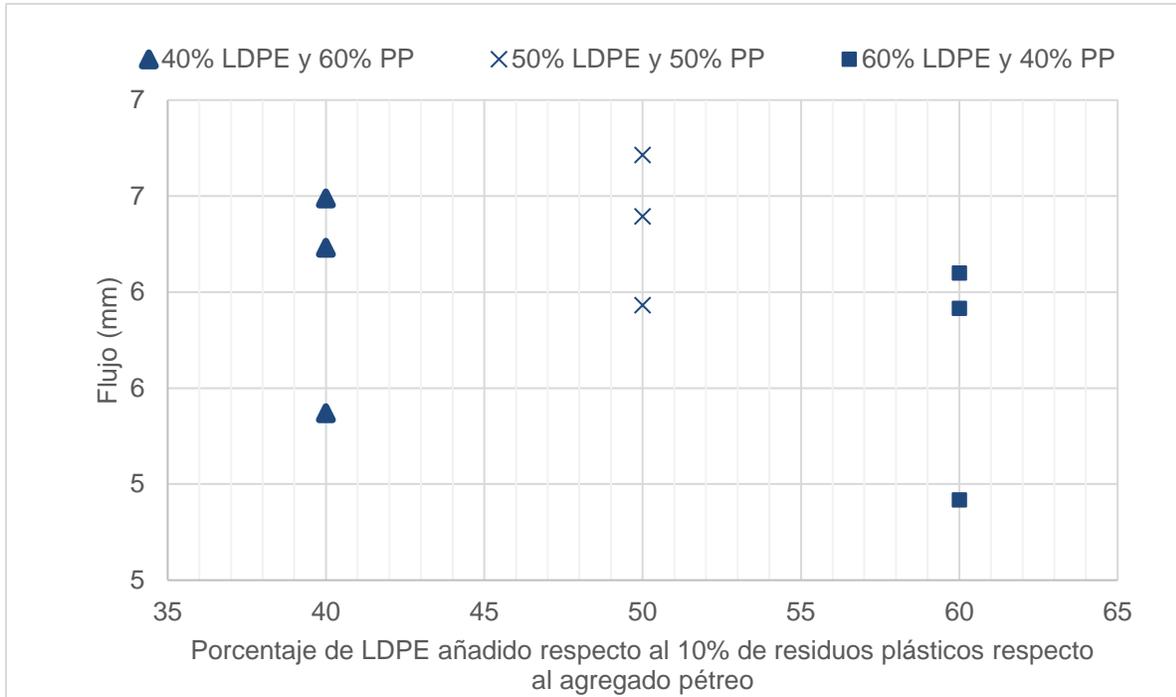


Figura 4.5.2 Contenido de Residuo plástico contra flujo, LDPE y PP Combinados
 Fuente: Elaboración propia

4.6 Selección de la mejor mezcla

Dado que en todos los especímenes se presenta una estabilidad mayor a la requerida en la mezcla, se decide elegir el porcentaje de plástico que mejor comportamiento haya tenido visualmente y durante el manejo y compactación de la mezcla, siendo este la adición del 10% del plástico. Este porcentaje ha demostrado no solo cumplir con los estándares de estabilidad exigidos, sino también mostrar propiedades destacadas durante la manipulación y compactación de la mezcla asfáltica.

Además, se observa una reducción en el flujo del espécimen al incorporar el polipropileno (PP) en un 10%, lo que sugiere una mejora en la cohesión y resistencia de la mezcla. Este fenómeno indica que la adición de solamente PP brindará características superiores de resistencia a la mezcla asfáltica, convirtiéndolo en un componente clave para mejorar las propiedades mecánicas de la mezcla.

Es relevante destacar que la adición del 10% de residuo plástico respecto a la mezcla compuesto de la combinación de 60% polietileno de baja densidad (LDPE) y 40% polipropileno (PP) también arroja resultados positivos en términos de resistencia, esta alternativa presenta un equilibrio interesante entre los dos tipos de plásticos, sugiriendo que la combinación de LDPE y PP puede ofrecer propiedades mejoradas en comparación con el uso individual de cada tipo de plástico. La figura 4.6.1 muestra el comportamiento en estabilidad de cada plástico y de la adición del 10% de residuo plástico compuesto de la combinación de los dos residuos, esta mezcla logra un valor de estabilidad bastante cercano a solo añadir LDPE. El flujo que muestra esta combinación resulta ser un valor intermedio entre el comportamiento que presenta añadir cada plástico por separado (figura 4.6.2). Esta mezcla, por lo tanto, podría ser considerada como una opción viable, brindando flexibilidad en la elección de materiales según las necesidades específicas de un proyecto.

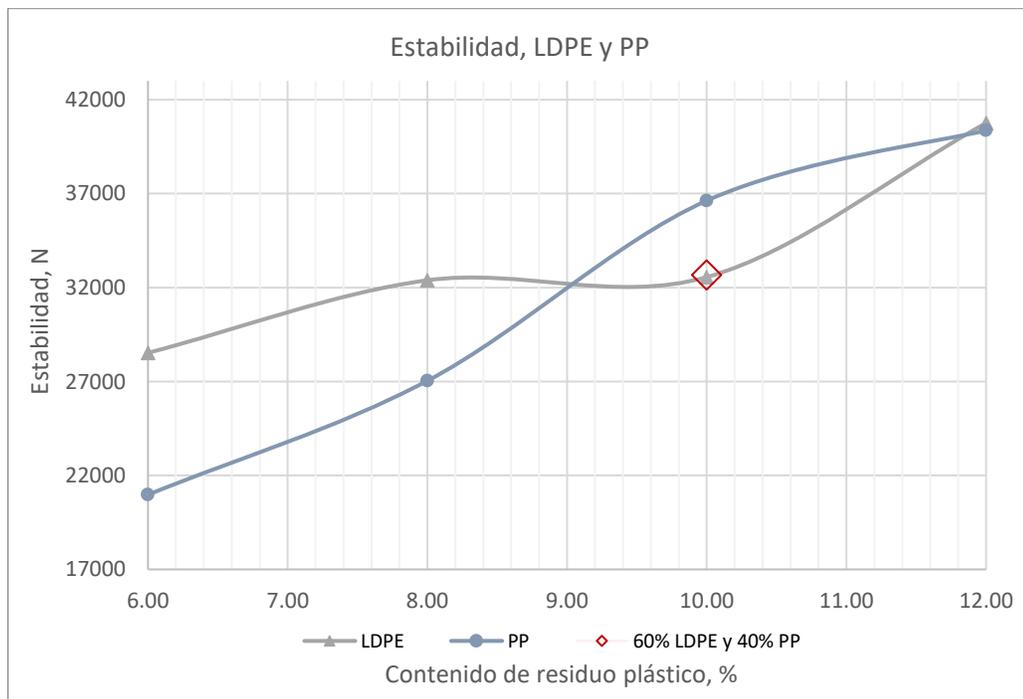


Figura 4.6.1 Contenido de Residuo plástico contra estabilidad, LDPE y PP Combinados
Fuente: Elaboración propia

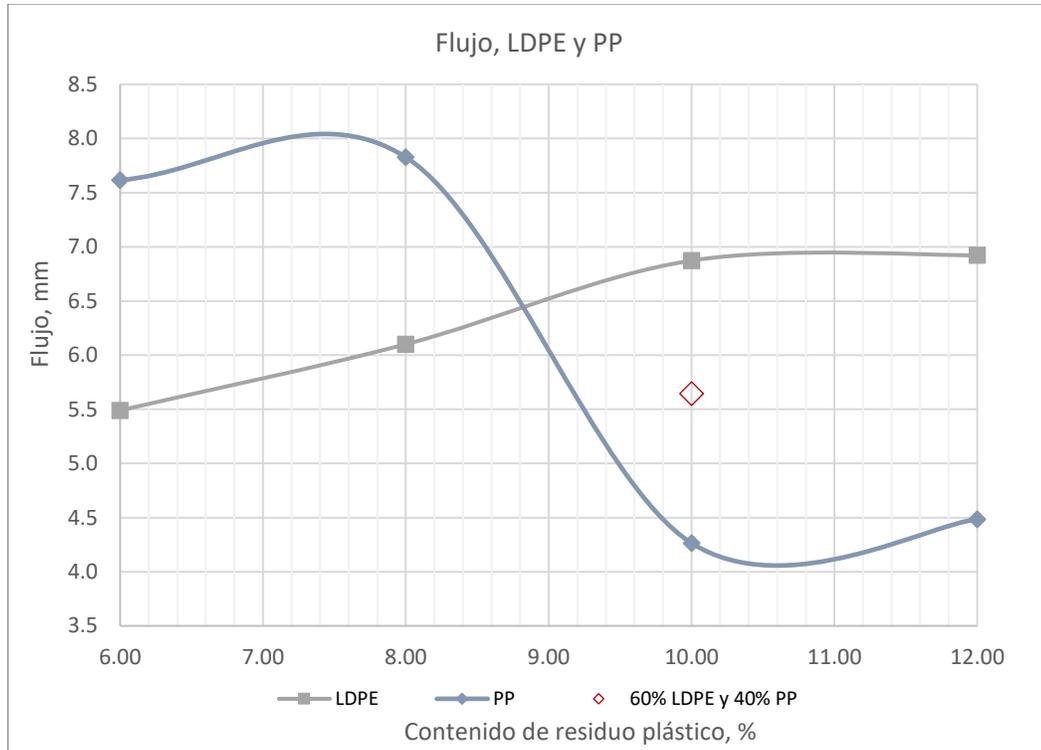


Figura 4.6.2 Contenido de Residuo plástico contra flujo, LDPE y PP Combinados
 Fuente: Elaboración propia

4.7 Comparación con la mezcla de control

En el caso de los especímenes adicionados con asfalto reducido en un 10% se puede observar que el peso volumétrico se ve disminuido considerablemente, debido al volumen y baja densidad de los plásticos de residuo adicionados, aunque en el parámetro de estabilidad, la mezcla de control se ve superada por los resultados obtenidos con las mezclas adicionadas, las cuales obtienen buenos resultados de estabilidad. En cuestión de flujo, en la mezcla de LPDP se ve altamente afectado, aumentando el valor de flujo, mientras que en el PP se observa que el flujo disminuye ligeramente, por lo que se puede considerar como no afectación a este parámetro de la mezcla.

Cuadro 4.7.1 Comparación de resultados con la mezcla de control

Plástico adicionado	Contenido de asfalto (%)	Peso Vol. (g/cm ³)	Estabilidad corregida (kN)	Flujo (mm)
No	4.5	2.493	13.18	4.52
LDPE al 10%	4.05	2.13	32.57	6.87
PP al 10%	4.05	2.07	36.65	4.26

Fuente: Elaboración propia

Plástico adicionado	Contenido de asfalto (%)	Estabilidad corregida (kN)	Flujo (mm)
40% LDPE y 60% PP	4.05	27.91	6.03
50% LDPE y 50% PP	4.05	24.96	6.35
60% LDPE y 40% PP	4.05	32.68	5.644

Fuente: Elaboración propia

4.8 Evaluación de resultados y prueba de hipótesis

En el muestreo del agregado grueso se obtuvieron agregados con las gradaciones necesarias para formar una mezcla de agregados en proporciones 20% Agregado 3/4", 35% agregado 1/2", 20% agregado 3/8" y 30 agregado Arena que lograra satisfacer la curva granulométrica requerida por la normativa, solamente con la observación de que la granulometría obtenida a partir de la mezcla de agregados queda sobre el límite de restricción de la curva en el agregado que pasa la malla no. 200 y muestra una tendencia hacia la parte fina sin salir de la curva de referencia. Por otro lado, el agregado pétreo muestra un excelente comportamiento frente al desgaste por abrasión tanto en la prueba de los ángeles como en la prueba microdeval, siendo un agregado bastante resistente a la abrasión, con además un ligero porcentaje de partículas planas y alargadas. La fracción gruesa y final de los agregados presentó una densidad relativamente alta. La prueba de azul de metileno resultó cercana al límite de 15 mg/g para la fracción fina del agregado arena, lo que

representa que el material es propenso a ser reactivo y tiene partículas muy finas, lo cual puede ser causa del origen del material como producto de trituración. Además, la angularidad de la arena fue ligeramente mayor a la mínima requerida en la especificación.

En lo que refiere al diseño Marshall se tuvo un resultado de densidad del cuerpo de ingenieros considerablemente alto de 2.75 el cual se puede explicar con la naturaleza y densidad del material pétreo por sí solo, lo que llevó a tener pesos volumétricos de la mezcla que alcanzaron 2.49. el diseño de la mezcla cumplió con lo requerido con un contenido de asfalto de 4.5% respecto al agregado, el cual resulta ser un valor bajo, pero se justificó con la elaboración de especímenes con 4 y 3.5% para revisar la correcta tendencia de las gráficas y así descartar algún error de ejecución, pese a que la mezcla asfáltica con un contenido de 4.5% de asfalto reporta un flujo al ensayarse en la prensa Marshall de 4.52 mm. Se decide utilizar esta como mezcla de control para evaluar el comportamiento de los plásticos reciclados, específicamente en el flujo.

Al adicionar LDPE en la mezcla asfáltica reducida en un 10% de asfalto se pudo observar un incremento de hasta 2.47 veces la estabilidad de la mezcla de control, cuando se utiliza el 10% en peso de la mezcla sustituido por dicho residuo plástico, por lo que indica su factibilidad para su uso, resultados como los de Zoorob y Suparma (2000) refuerzan el aumento de estabilidad pues en una mezcla asfáltica adicionada con 30% en volumen de LDPE se logran valores de estabilidad aproximadamente de 2.5 veces más que las mezclas de control, la diferencia en utilizar el método de este trabajo consiste en añadir el residuo plástico por medio de porcentaje respecto al peso de la mezcla, no respecto al volumen, además del uso de un asfalto clasificado por grado de penetración. En cuanto al flujo se presentó un comportamiento dúctil en el ensayo de la mezcla, llegando a tener valores de flujo que rebasan los 7 mm, por lo que comparado con investigaciones como la de Istaña & Salazar (2022) en las que obtienen un valor de 12 mm de flujo con tan solo añadir 0.12% de bolsas de plástico de LDPE en una mezcla, resulta considerable la adición

de LDPE en forma de pellets.

Al adicionar el 10% de residuos de PP se observaron estabilidades que superan con hasta 2.8 veces la estabilidad de la mezcla de control con una ligera reducción del flujo en la que se registraron valores de hasta 4.26 mm. Autores como Brasileiro et al. (2019) Sugiere que la adición de residuos plásticos óptima, específicamente PP oscila en un rango del 3 al 5% para mejorar la resistencia de las mezclas asfálticas, pero para el caso de los plásticos utilizados en este trabajo, explorando en valores de 6, 8, 10 y 12% se presenta el óptimo en 10% de residuo plástico, la diferencia es que Brasileiro et al. (2019) utiliza el método húmedo de incorporación en la mezcla, siendo un proceso más complicado para llevar a campo. En cuestión de flujo, se puede observar que se logra una reducción al adicionar PP de 4.52 mm a 4.26 mm lo que equivale a aproximadamente un 6%, aunque autores como Al-Hadidy & Yi-qiu, (2009). Reportan que al adicionar 5% de PP se produce aproximadamente una reducción del 20% de la ductilidad, dado que en este caso el PP fue previamente degradado térmicamente y agregado en forma de polvo.

Citando la hipótesis “Con la adición de residuos de plástico LDPE y PP en la mezcla asfáltica se logra una disminución del 10% o menor del contenido de asfalto utilizado en una mezcla de control sin afectar las propiedades de estabilidad y flujo de una mezcla de control”.

Se puede resolver que, si se trabajan por separado los residuos plásticos, por el lado del PP la hipótesis se cumple completamente, pues no existe mayor variación en el flujo respecto a la mezcla de control y se logra aumentar la estabilidad, pero por el lado del LDPE la hipótesis se rechaza puesto que el flujo supera significativamente al flujo de la mezcla de control, mientras que al combinar ambos plásticos se mejora la estabilidad, y aunque el flujo se ve menos afectado tiene variaciones considerables comparado con una mezcla de control.

4.9 Conclusiones

Las conclusiones extraídas de la adición de LDPE y PP en forma de pellets con un tamaño aproximado de 6mm a la mezcla asfáltica son reveladoras y sugieren consideraciones importantes para la optimización de mezclas asfálticas sostenibles:

- **Adición de LDPE:**

Incremento de Estabilidad: La incorporación de residuos de LDPE en la mezcla asfáltica demuestra un aumento significativo en la estabilidad, incluso cuando se reduce el contenido de asfalto en un 10%. Esto indica que el LDPE, en forma de pellets, contribuye positivamente a las propiedades mecánicas de la mezcla, mejorando su capacidad para resistir deformaciones y cargas.

Desafío en el Flujo: A pesar de la mejora en la estabilidad, se observa un desafío en el aspecto del flujo de la mezcla, ya que se incrementa más allá de los límites especificados en las normativas. Este resultado sugiere que, mientras que el LDPE mejora la estabilidad, puede tener implicaciones en términos de la trabajabilidad de la mezcla durante su aplicación.

- **Adición de PP:**

Aumento de Estabilidad: La adición de residuos de PP en la mezcla asfáltica también conlleva un incremento considerable en el parámetro de estabilidad, incluso con una reducción del 10% en el contenido de asfalto. Este resultado destaca la capacidad del PP para reforzar las propiedades estructurales de la mezcla.

Comportamiento de Rigidización: A diferencia del LDPE, el PP muestra una tendencia a rigidizar la mezcla, evidenciada por una ligera reducción en el flujo. Este comportamiento se atribuye a la mayor temperatura de fusión del PP, lo que implica que los pellets conservan su forma durante el mezclado, contribuyendo así a una

mayor estabilidad y a un comportamiento más rígido en términos de flujo.

En el análisis conjunto de la adición de ambos residuos plásticos, se derivan conclusiones valiosas que ofrecen perspectivas clave para la toma de decisiones en la formulación de mezclas asfálticas. Estos resultados fundamentales permiten identificar la mejor estrategia en función de las prioridades específicas del uso de dichas mezclas, dependiendo qué se priorice para su selección se tienen dos vertientes a considerar:

- **Priorización del Comportamiento Mecánico:**

En términos del comportamiento mecánico deseado de la mezcla asfáltica, la adición exclusiva de PP emerge como la opción preferida. Esta elección se sustenta en la evidencia de que el PP aporta una estabilidad significativamente superior, así como una tendencia a rigidizar la mezcla, características esenciales para la resistencia estructural y durabilidad de las capas asfálticas, pues se reporta el valor más alto de estabilidad en los ensayos, teniendo 2.8 veces más de la reportada en la mezcla de control.

- **Optimización del Aprovechamiento de Ambos Residuos:**

Sin embargo, cuando se busca aprovechar de manera más completa los beneficios de ambos residuos plásticos, la opción 60LDPE 40PP se presenta como una alternativa equilibrada y prometedora. Esta combinación demuestra ser una solución intermedia que logra armonizar la deformación por flujo, un aspecto crucial en términos de trabajabilidad y aplicación de la mezcla asfáltica en campo. Además, se destaca que la estabilidad resultante de esta combinación supera los requisitos mínimos especificados, aunque no alcance el nivel sobresaliente alcanzado al solo incorporar PP.

- **Consideraciones para la Elección Óptima:**

La elección entre la utilización exclusiva de PP y la combinación 60LDPE 40PP dependerá de las metas y requisitos específicos del uso de la mezcla. Si la prioridad

es la máxima estabilidad y resistencia mecánica, la opción individual de PP es la más indicada. Por otro lado, si se busca un enfoque más integral que equilibre tanto la deformación por flujo como la estabilidad, la combinación 60LDPE 40PP se presenta como una elección estratégica, ofreciendo un rendimiento robusto que supera las especificaciones mínimas requeridas.

En ambos casos, la adición de residuos plásticos permitió reducir en un 10% el contenido de asfalto de la mezcla de control. La disminución del contenido de asfalto en una mezcla asfáltica puede tener diversas implicaciones en sus propiedades y comportamiento. Por un lado, la reducción del contenido de asfalto puede facilitar la trabajabilidad y compactación de la mezcla durante la construcción. Una mezcla más liviana y manejable puede ser más fácil de colocar y compactar adecuadamente en el sitio. Sin embargo, una disminución excesiva podría hacer que la mezcla sea más difícil de manipular y compactar, lo que podría afectar la calidad del pavimento. En términos de estabilidad mecánica, la disminución del contenido de asfalto acompañada por la adición de otros materiales de residuos plásticos se puede mantener o incluso mejorar la estabilidad mecánica de la mezcla.

Una disminución excesiva en el contenido de asfalto sin un ajuste adecuado podría resultar en una pérdida de cohesión y resistencia de la mezcla, afectando negativamente su capacidad para soportar cargas de tráfico y las condiciones ambientales, por lo que en este trabajo se considera que la reducción del 10% del contenido de una mezcla base es adecuado para no perder cohesión ni resistencia de la mezcla.

La disminución del contenido de asfalto puede ofrecer beneficios en términos de trabajabilidad y sostenibilidad, pero debe hacerse de manera controlada y considerando factores como la estabilidad, durabilidad y resistencia de la mezcla. La incorporación de residuos plásticos, compensa la reducción del asfalto mantiene y mejora propiedades de la mezcla asfáltica, aunque deberá buscarse también que en

cuestión de costos se logre un equilibrio ya que el costo del kg de pellets de LDPE ronda alrededor de 9 a 12 pesos mexicanos (0.52 a 0.7 USD), consultado den noviembre 2023, mientras que el precio de kg de pellets de PP de residuo tiene un costo mayor, que va de los 15 a 17 pesos mexicanos (0.87 a 1 USD), consultado den noviembre 2023, por lo que la opción de usarlos en la combinación 60 LDPE y 40 PP resulta ser una buena opción.

Para trabajos posteriores es preciso evaluar el comportamiento de esta combinación específica de residuos plásticos con criterios de deformación permanente y susceptibilidad a la humedad.

4.10 Anexos

Referencias Bibliográficas

1. American Association of State Highway and Transportation Officials. (2020). *Standard method of test for sieve analysis of fine and coarse aggregates (AASHTO T 27, 2020 edition)*. AASHTO.
2. American Association of State Highway and Transportation Officials. (2020). *Standard method of test for materials finer than 75- μ m (No. 200) sieve in mineral aggregates by washing (AASHTO T 11)*. AASHTO.
3. American Association of State Highway and Transportation Officials. (2019). *Standard method of test for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine (AASHTO T 96-02)*. AASHTO.
4. American Association of State Highway and Transportation Officials. (2020). *Standard method of test for soundness of aggregate by use of sodium sulfate or magnesium sulfate (AASHTO T 104-99)*. AASHTO.
5. Adou, F., Ampadu, B., Agyepong, N. K., & Soli, O. N.-A. (2018). Assessing plastic waste usage as additives in flexible asphalt mix for road construction. *Civil and Environmental Research*, 10(2), 32–38.
6. Alarcón Ibarra, J. (2003). *Estudio del comportamiento de mezclas bituminosas recicladas en caliente en planta*. Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona.
7. American Association of State Highway and Transportation Officials, & National Cooperative Highway Research Program. (1993). *AASHTO guide for design of pavement structures, 1993*. The Association.
8. Angelone, S., Cauhapé Casaux, M., Borghi, M., & Martinez, F. O. (2015). Green pavements: Reuse of plastic waste in asphalt mixtures. *Materials and Structures*, 49(5), 1655–1665. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0602-x>
9. Appiah, J. K., Berko-Boateng, V. N., & Tagbor, T. A. (2017). Use of waste plastic materials for road construction in Ghana. *Case Studies in Construction Materials*, 6, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2016.11.001>
10. ASTM International. (2017). *Standard test method for resistance of coarse aggregate to degradation by abrasion in the Micro-Deval apparatus (ASTM D6928-17)*. ASTM International.
11. ASTM International. (2017). *Standard test method for determining the percentage of fractured particles in coarse aggregate (ASTM D5821-13)*. ASTM International.
12. Balaguera, A., Carvajal, G., Alvertí, J., & Fullama, P. (2018). Life cycle assessment of road construction alternative materials: A literature review. *Resources, Conservation & Recycling*, 132, 37-48. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.003>

13. Bibi Farouk, A. I., Hassan, N., Mahmud, M. Z. H., Mirza, J., Putra Jaya, R., Hainin, M. R., Yaacob, H., & Md Yusoff, N. I. (2017). Effects of mixture design variables on rubber-bitumen interaction: Properties of dry mixed rubberized asphalt mixture. *Materials and Structures*, 50, 1-12. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0932-3>
14. ASTM International. (2009). *ASTM D3515-01: Standard specification for hot-mixed, hot-laid bituminous paving mixtures*.
15. ASTM International. (2016). *ASTM D6927: Standard test method for Marshall stability and flow of asphalt mixtures*.
16. ASTM International. (2016). *ASTM D6926: Standard practice for preparation of asphalt mixture specimens using Marshall apparatus*.
17. Awoyera, P., & Adesina, A. (2020). Plastic wastes to construction products: Status, limitations, and future perspective. *Case Studies in Construction Materials*, 12, e00330. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00330>
18. Ayala del T., Y., Delgado A., H., Guzmán O., D. V., & Salazar R., A. Z. (2018). *Manual de ensayos para laboratorio mezclas asfálticas en caliente (MAC): Parte 1 para el cálculo de volumetría y ensayos de desempeño*. Instituto Mexicano del Transporte.
19. Brasileiro, L., Moreno-Navarro, F., Tauste-Martínez, R., Matos, J., & Rubio-Gámez, M. (2019). Reclaimed polymers as asphalt binder modifiers for more sustainable roads: A review. *Sustainability*, 11(3), 646. <https://doi.org/10.3390/su11030646>
20. Cabrera, J. (2013). *Evaluación, análisis y determinación de la vida remanente del pavimento mediante la auscultación con el Ground Penetrating Radar (GPR)* [Tesis de especialidad en Vías Terrestres, UNAM].
21. Dalhat, M. A., & Al-Abdul Wahhab, H. I. (2015). Performance of recycled plastic waste modified asphalt binder in Saudi Arabia. *International Journal of Pavement Engineering*, 18(4), 349–357. <https://doi.org/10.1080/10298436.2015.1088150>
22. Delgado Alamilla, H. (2020). *Diseño de mezclas asfálticas densas en caliente en función del nivel de tránsito* (Publicación Técnica No. 602). Instituto Mexicano del Transporte.
23. Figueroa, A., Fonseca, E., & Reyes, F. (2009). Caracterización fisicoquímica y morfológica de asfaltos modificados con material reciclado. *Ingeniería y Universidad*, 13(1), 45-70. Pontificia Universidad Javeriana.
24. Gao, Y., Huang, X., & Yu, W. (2014). The compaction characteristics of hot mixed asphalt mixtures. *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition*, 29(5), 956–959. <https://doi.org/10.1007/s11595-014-1027-z>
25. Garnica Anguas, P., Delgado Alamilla, H., & Gómez López, J. A. (2004). *Análisis de la influencia del método de compactación en el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas*.
26. Gulseven, O., Ashkanani, S., Abdullah, S., Ismaeil, H., Alkandari, H., & Baroun, M. (2019). A sustainable model for enhancing road quality with recycled plastic bags. *Kuwait Journal of Science*, 46(1), 112-119.
27. Ghuzlan, K., Al-Khateeb, G., & Qasem, Y. (2015). Rheological properties of polyethylene-modified asphalt binder. *Athens Journal of Technology & Engineering*, 2(2), 75-88. <https://doi.org/10.30958/ajte.2-2-1>
28. Hake, S., Damgir, R., & Awsarmal, P. (2020). Utilization of plastic waste in bitumen mixes for flexible pavement. *Transportation Research Procedia*, 48, 3779–3785. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.041>
29. Istaña Incacoña, L. M., & Salazar Culqui, R. (2022). *Utilización de bolsas LDPE y fibras PP recicladas en mezclas asfálticas con RC-250 (Mz. E''-G'') Av. 28 de Julio, Moquegua – 2022*.
30. Jiménez A., M., Sibaja O., D., & Molina Z., D. (2009). *Mezclas asfálticas en frío en Costa Rica: Conceptos, ensayos y especificaciones*.

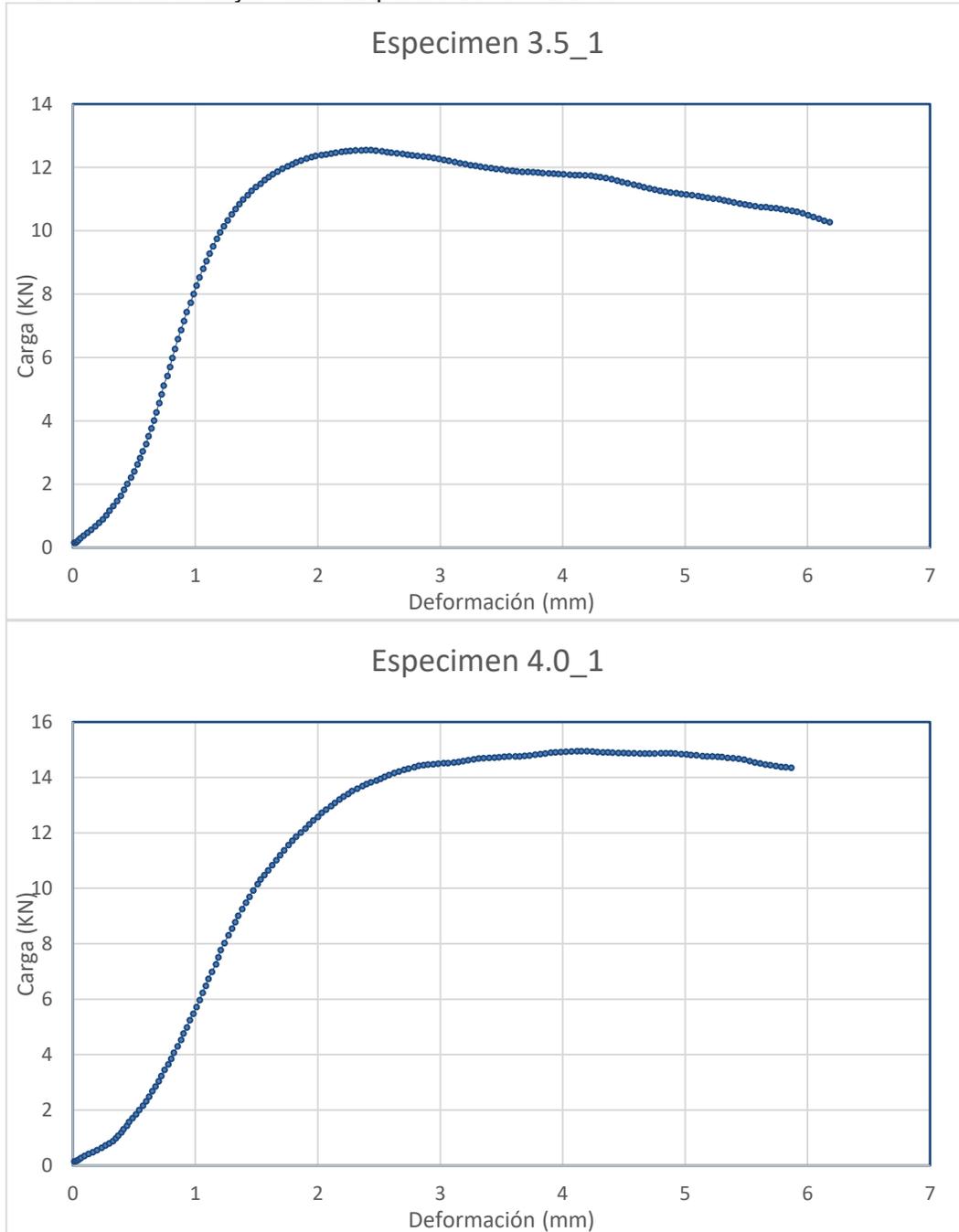
31. Kalantar, Z., Karim, M., & Mahrez, A. (2012). A review of using waste and virgin polymer in pavement. *Construction and Building Materials*, 33, 55–62. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.01.009>
32. Khan, I. M., Kabir, S., Alhussain, M. A., & Almansoor, F. F. (2016). Asphalt design using recycled plastic and crumb-rubber waste for sustainable pavement construction. *Procedia Engineering*, 145, 1557–1564. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.196>
33. Koerner, G. R., & Koerner, R. M. (2018). Polymeric geomembrane components in landfill liners. *Solid Waste Landfilling*, 313–341. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-407721-8.00017-6>
34. Ma, Y., Wang, S., Zhou, H., Hu, W., Polaczyk, P., Zhang, M., & Huang, B. (2021). Compatibility and rheological characterization of asphalt modified with recycled rubber-plastic blends. *Construction and Building Materials*, 270, 121416. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121416>
35. Ma, Y., Zhou, H., Jiang, X., Polaczyk, P., Xiao, R., Zhang, M., & Huang, B. (2021). The utilization of waste plastics in asphalt pavements: A review. *Cleaner Materials*, 2, 100031. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2021.100031>
36. Mahfouz, H., Tolba, I., El Sayed, M., Semeida, M., Mawsouf, N., El Laithy, N., Saady, M., Khedr, S., & Breakah, T. (2016). Using recycled plastic as hot mix asphalt modifiers. *Resilient Infrastructure, London, England, United Kingdom*.
37. Mashaan, N. S., Chegenizadeh, A., Nikraz, H., & Rezagholilou, A. (2021). Investigating the engineering properties of asphalt binder modified with waste plastic polymer. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(2), 1569–1574. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.08.035>
38. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2002). *M.MMP.4.04.001/02: Muestreo de materiales pétreos para mezclas asfálticas*.
39. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2017). *N.CMT-4-04/17: Materiales pétreos para mezclas asfálticas*.
40. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2008). *N.CMT-4-05-003/08: Calidad de mezclas asfálticas para carreteras*.
41. Paredes, M. E. V. A. (2009). *Comportamiento mecánico de las mezclas tipo SMA (Stone Mastic Asphalt)*. Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú.
42. Pan, D., Su, F., Liu, C., & Guo, Z. (2020). Research progress for plastic waste management and manufacture of value-added products. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 3(4), 443–461. <https://doi.org/10.1007/s42114-020-00190-0>
43. Plati, C. (2019). Sustainability factors in pavement materials, design, and preservation strategies: A literature review. *Construction and Building Materials*, 211, 539-555. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.242>
44. Ramos, G. B. L., & Muñoz, P. C. I. (2013). *Propuesta de diseño de mezcla asfáltica en frío de graduación densa como alternativa para el mantenimiento de pavimentos flexibles* (Tesis de licenciatura). Universidad Centroamericana, Facultad de Ciencia, Tecnología y Ambiente, Departamento de Ciencias Básicas.
45. Reyes, F. (2012). Mezclas asfálticas modificadas con un elastómero (caucho) y un plastómero (tiras de bolsas de leche con asfalto 80-100). *Infraestructura Vial*, 9.
46. Reyes-Ortiz, O. J., & Camacho-Tauta, J. (2008). Influencia de la granulometría en la resistencia al ahuellamiento de mezclas asfálticas. *Ingeniería y Desarrollo*, 23, 26-42. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-34612008000100004
47. Rondón Quintana, H. A. (2009). *Pavimentos: Serie Guías: 1 Fundamentos* (1a ed.). Bogotá: Stella Valbuena García.
48. Ruiz, R. (2013). *AC-20 Introducción al asfalto*. SEM Group - Tecnología e Innovación. <https://www.portal-comercial-smm.com/articulos-tecnicos-AC20-EKBE-introduccion-al-asfalto.php>

49. Sastri, V. R. (2014). Commodity thermoplastics. In *Plastics in Medical Devices* (pp. 73–120). <https://doi.org/10.1016/b978-1-4557-3201-2.00006-9>
50. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales & Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2020). *Panorama general de las tecnologías de reciclaje de plásticos en México y en el mundo*.
51. Segura Almanza, A. T. (2016). *Estudio del comportamiento físico y mecánico de mezclas asfálticas con materiales reutilizables en la construcción como escoria de acero* (Tesis de licenciatura). Universidad Católica de Colombia, Facultad de Ingeniería.
52. Téllez, R. (2012). *Pavimentos rígidos o flexibles: Concreto vs. asfalto, dilema en infraestructura de vías terrestres* (Nota 134). Instituto Mexicano del Transporte.
53. Thives, L. P., & Ghisi, E. (2017). Asphalt mixtures emission and energy consumption: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 473–484. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.087>
54. United Nations Environmental Programme (UNEP). (2018). *Our planet is drowning in plastic pollution*. <https://www.unenvironment.org/interactive/beat-plastic-pollution/>
55. White, G., & Magee, C. (2019). Laboratory evaluation of asphalt containing recycled plastic as a bitumen extender and modifier. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 7(5), 218-235.
56. Xu, F., Zhao, Y., & Li, K. (2021). Using waste plastics as asphalt modifier: A review. *Materials*, 15(1), 110. <https://doi.org/10.3390/ma15010110>
57. Zoorob, S., & Suparna, L. (2000). Laboratory design and investigation of the properties of continuously graded asphaltic concrete containing recycled plastics aggregate replacement (Plastiphalt). *Cement and Concrete Composites*, 22(4), 233–242. [https://doi.org/10.1016/s0958-9465\(00\)00026-3](https://doi.org/10.1016/s0958-9465(00)00026-3)

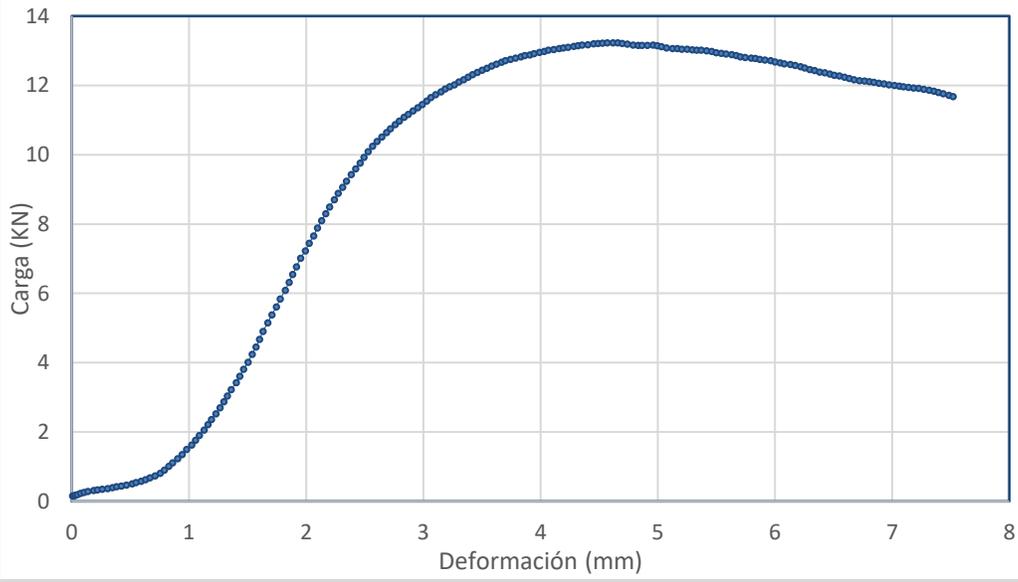
APENDICE

APENDICE

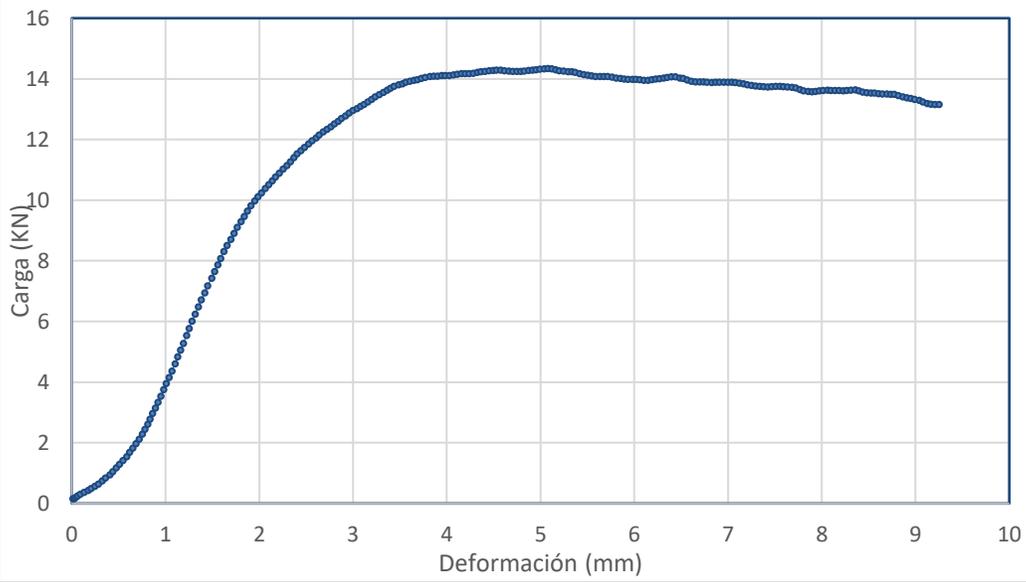
Anexo 1 Gráficas de ensaye Pastillas para diseño Marshall



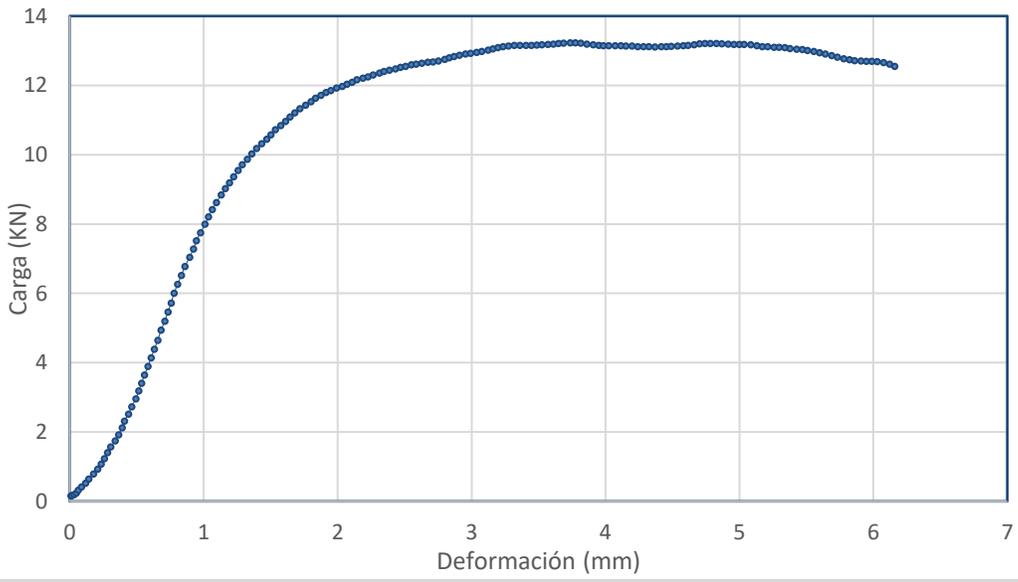
Especimen 4.5_1



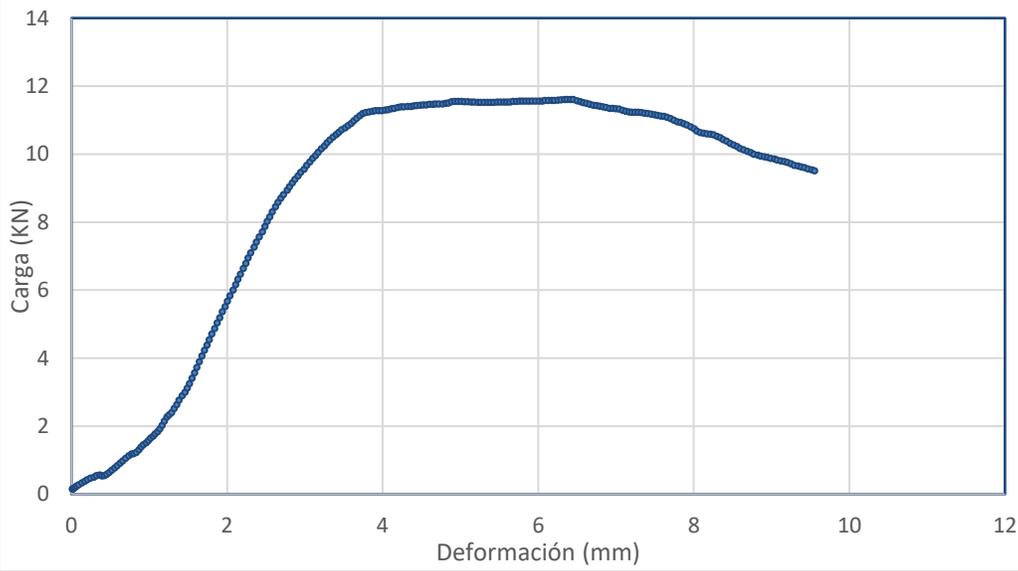
Especimen 4.5_2



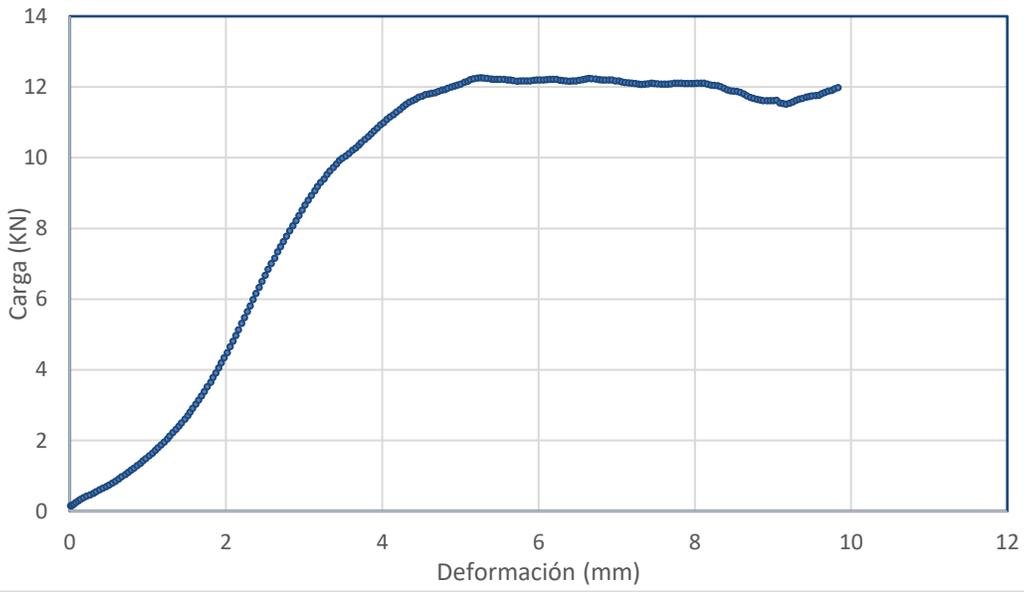
Especimen 4.5_3



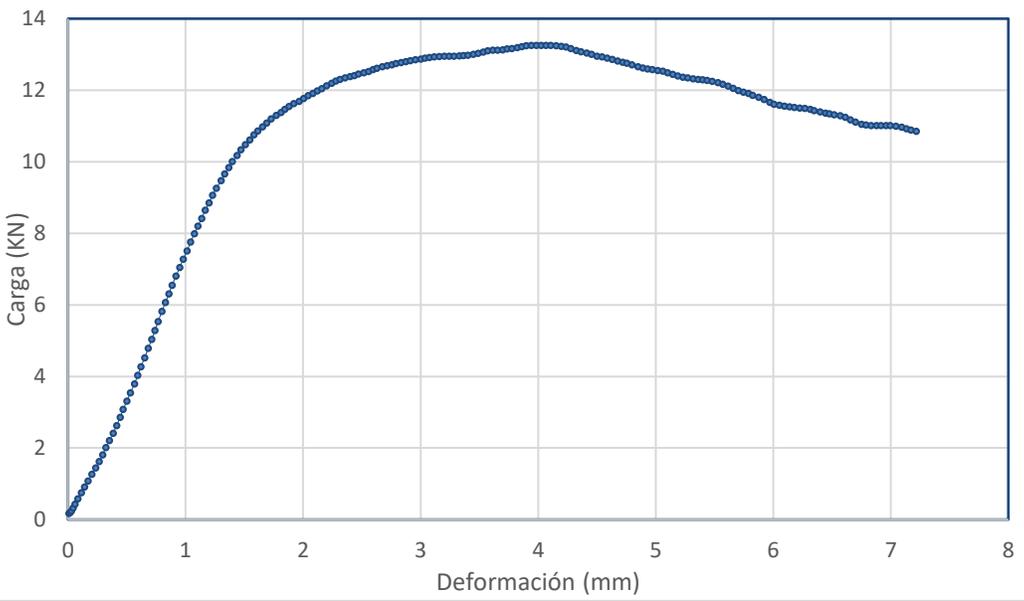
Especimen 5.0_1



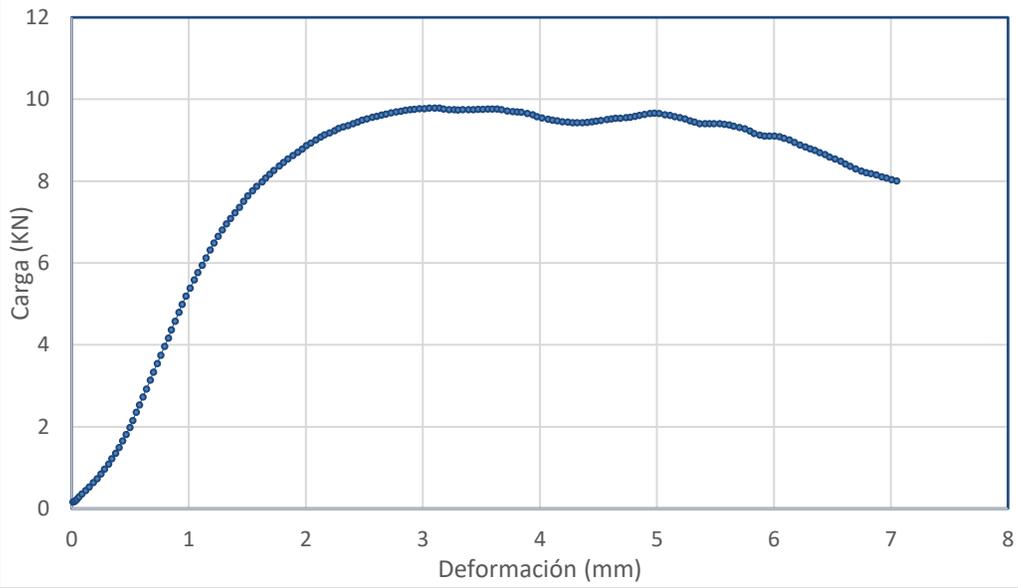
Especimen 5.0_2



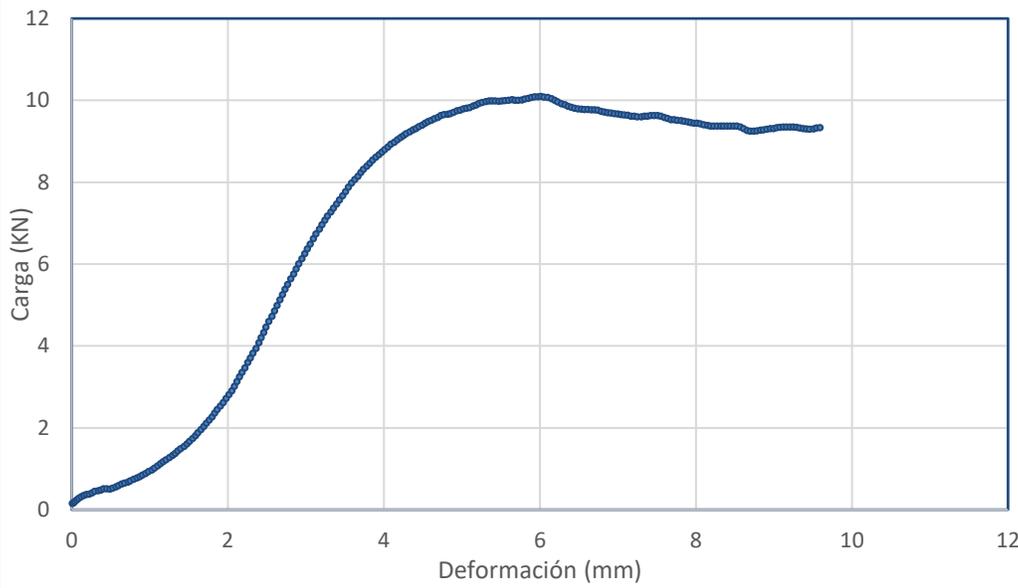
Especimen 5.0_3



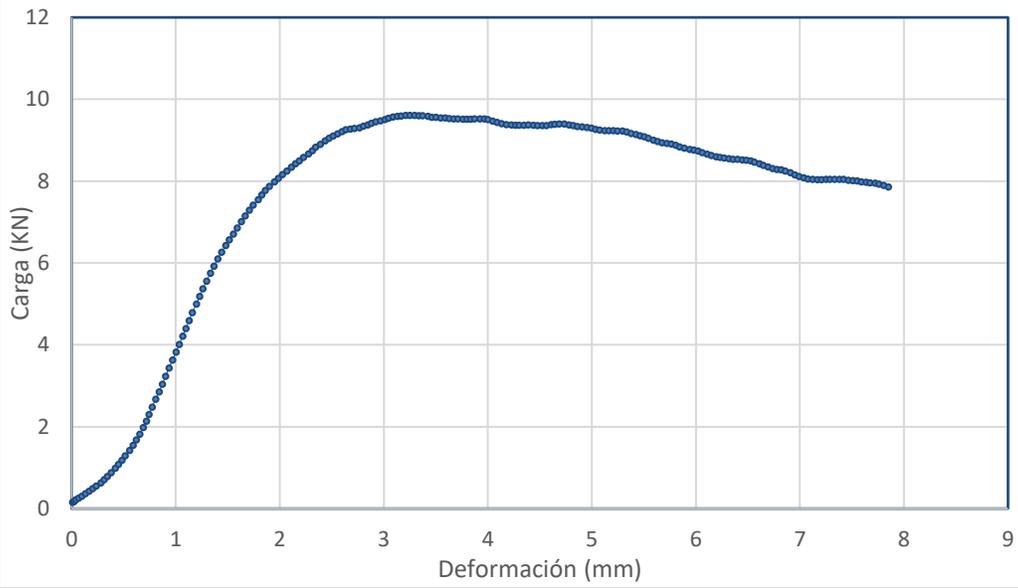
Especimen 5.5_1



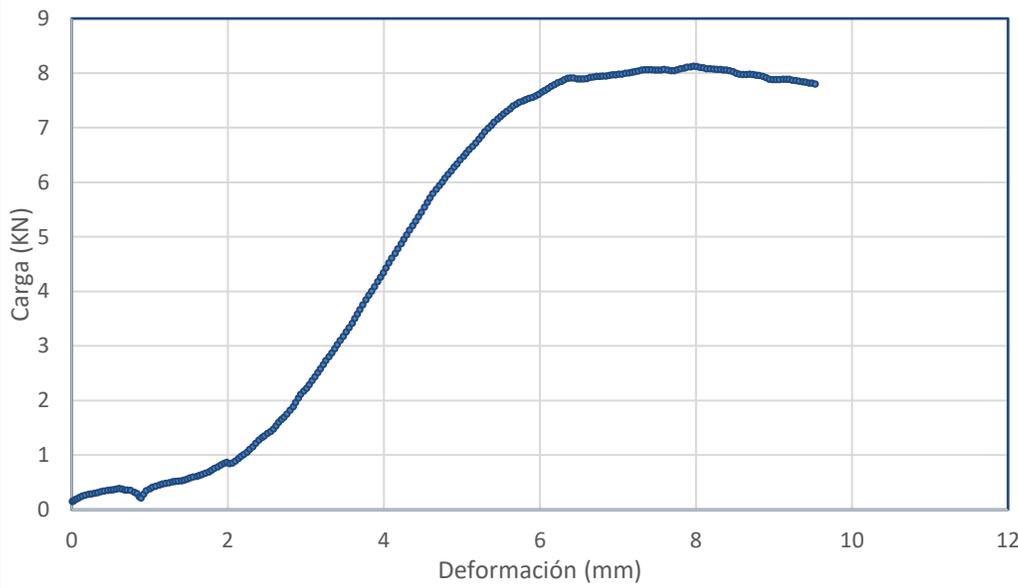
Especimen 5.5_2



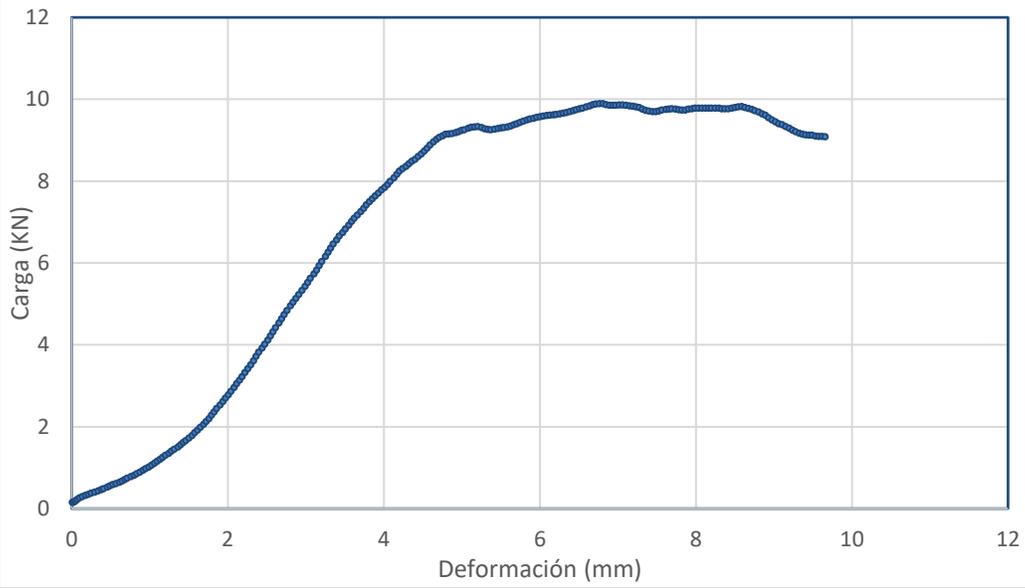
Especimen 5.5_3



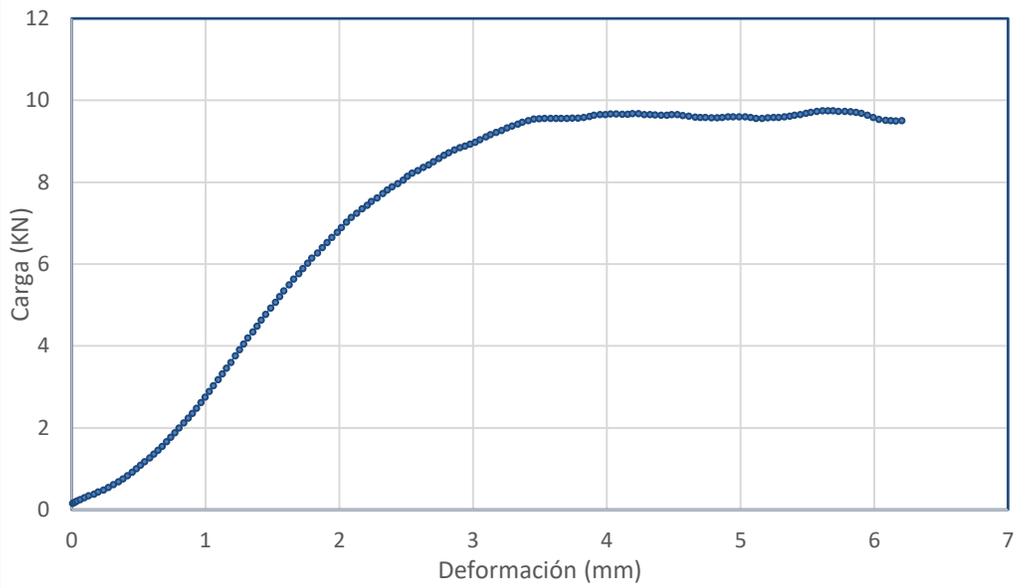
Especimen 6.0_1

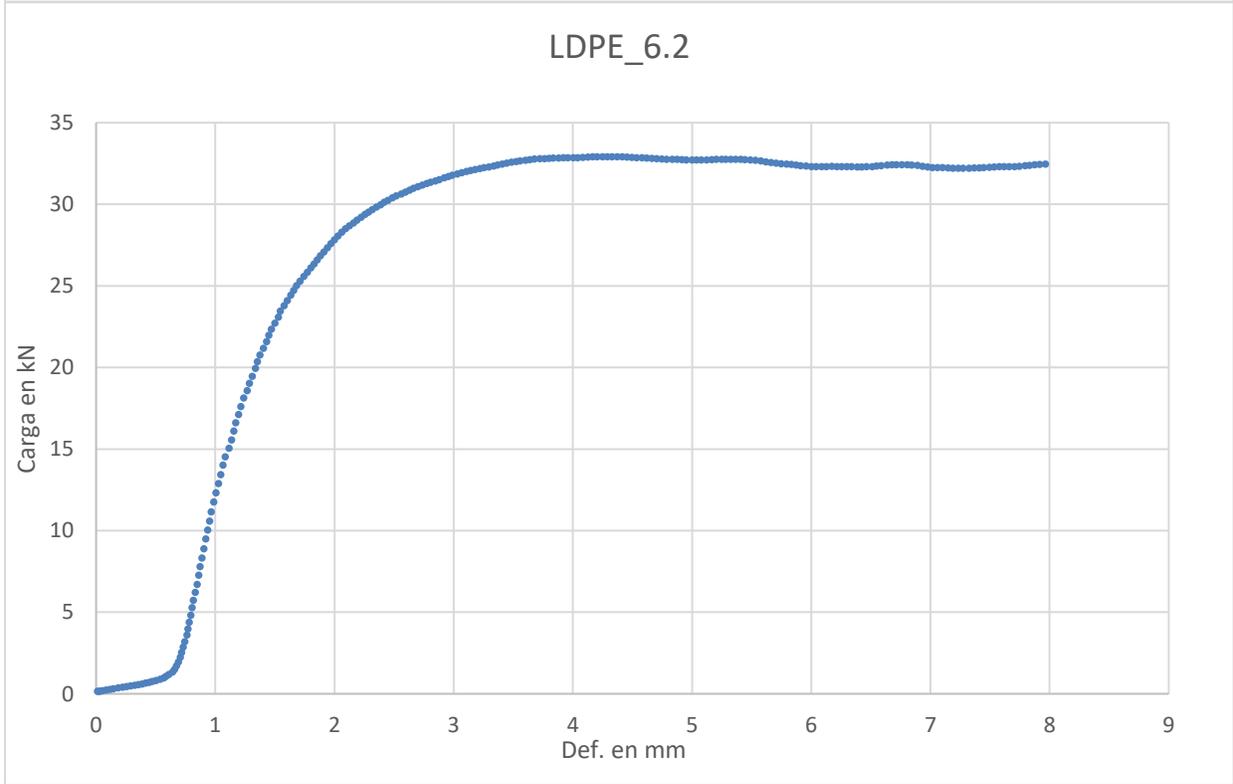
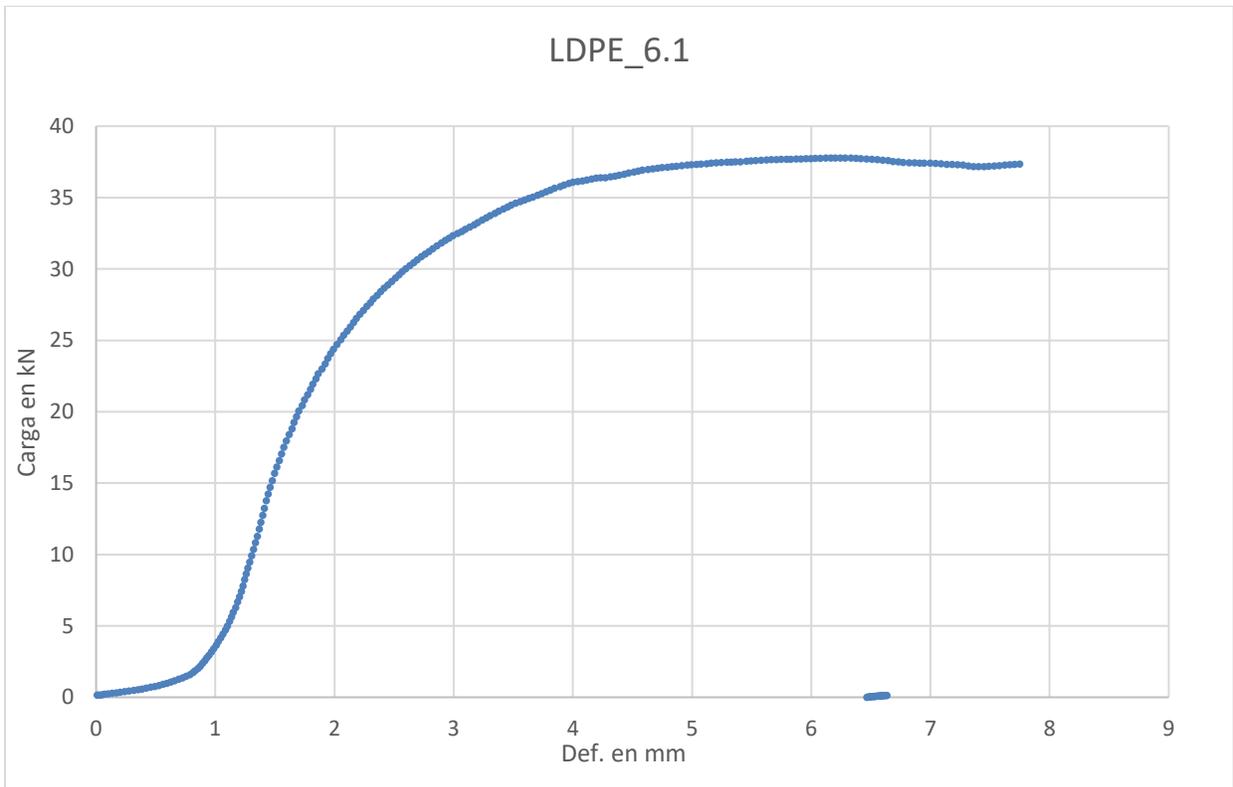


Especimen 6.0_2

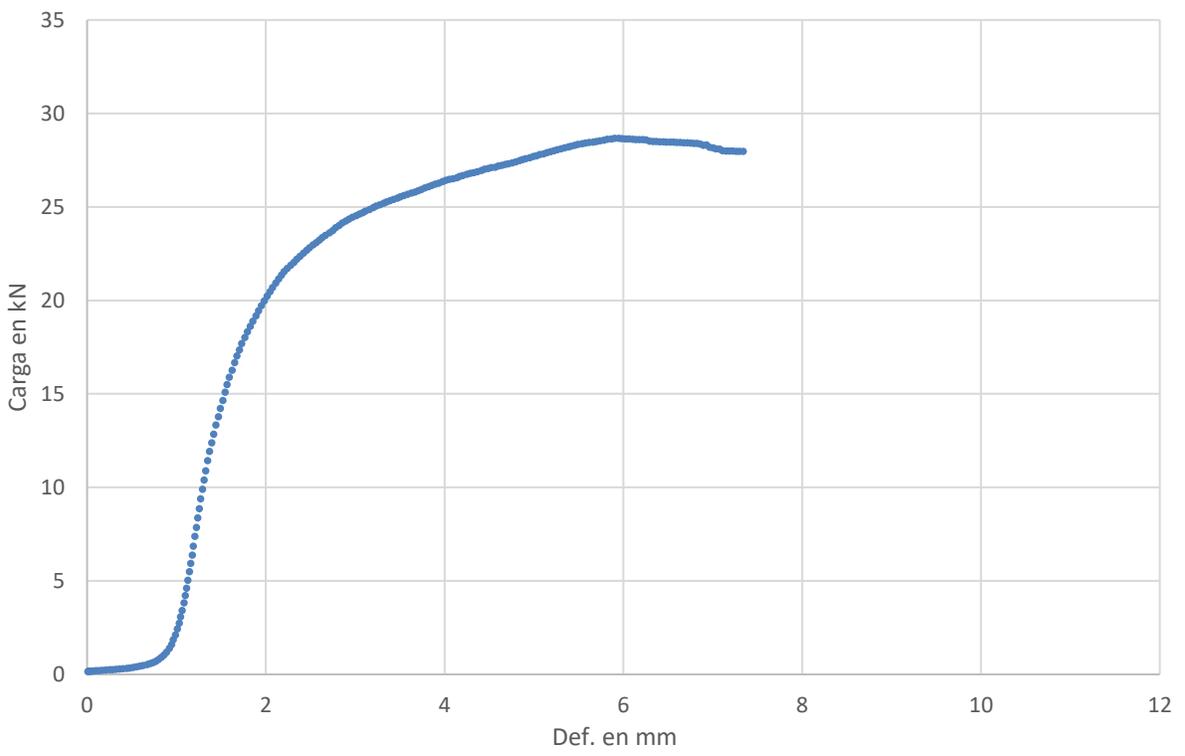


Especimen 6.0_3

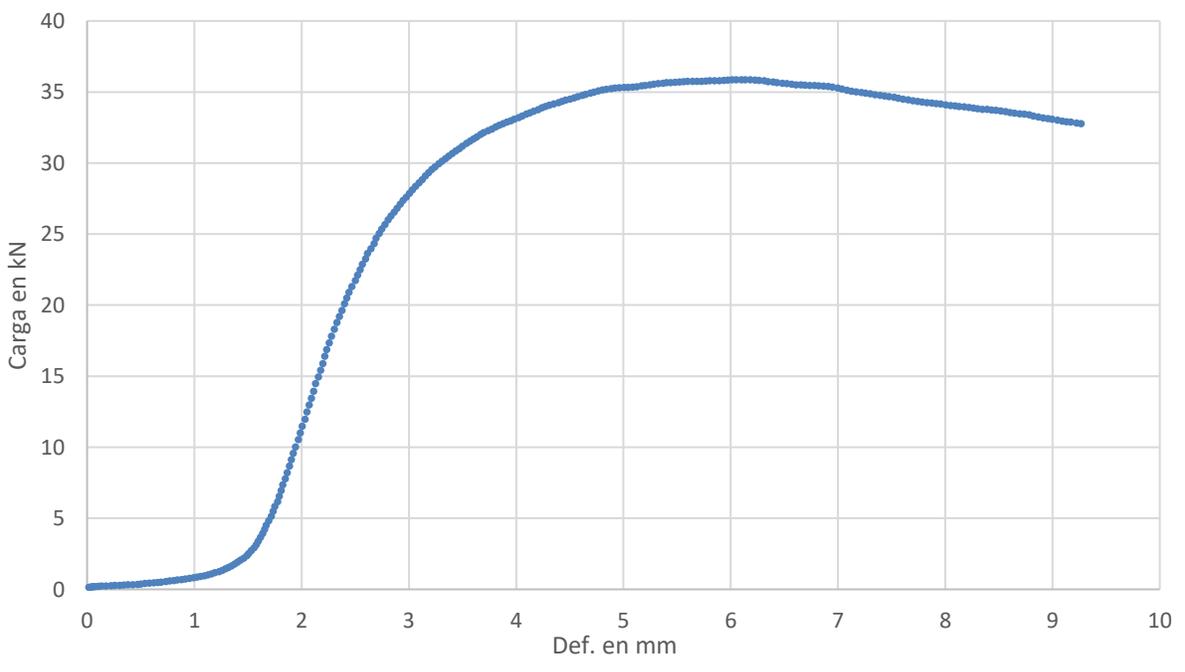


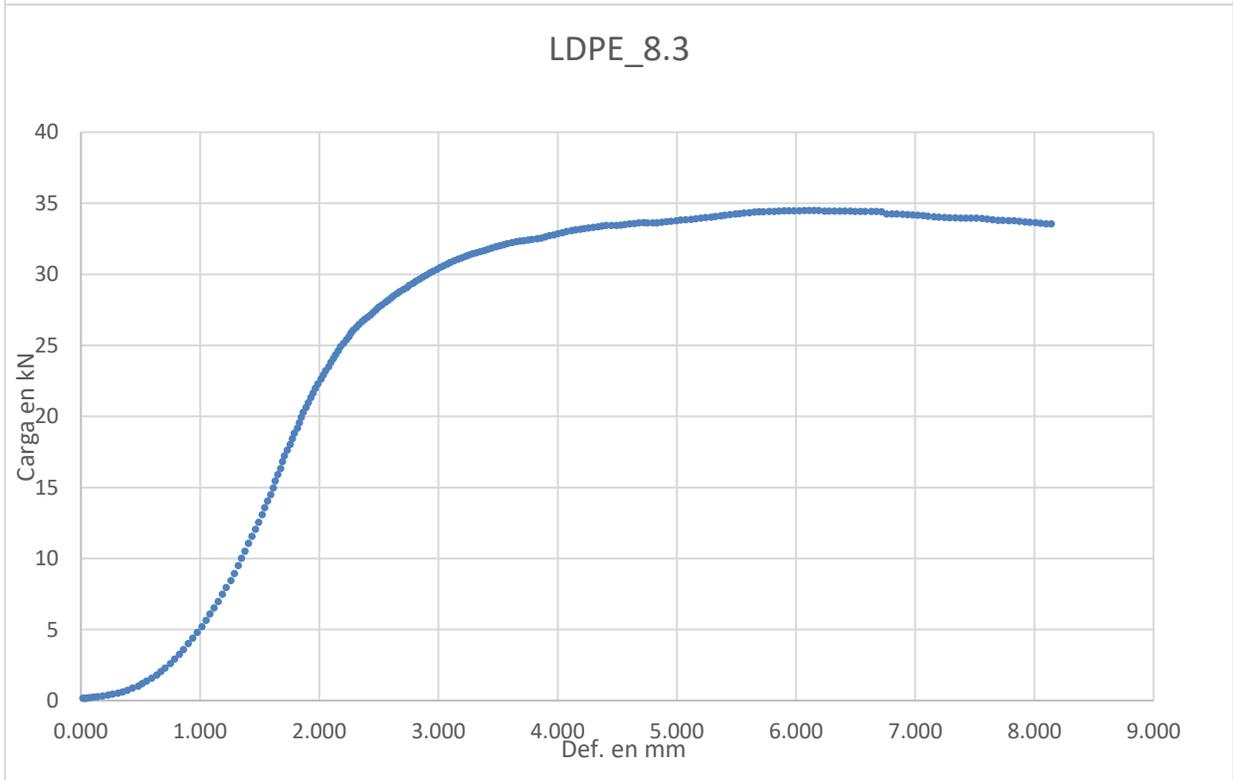
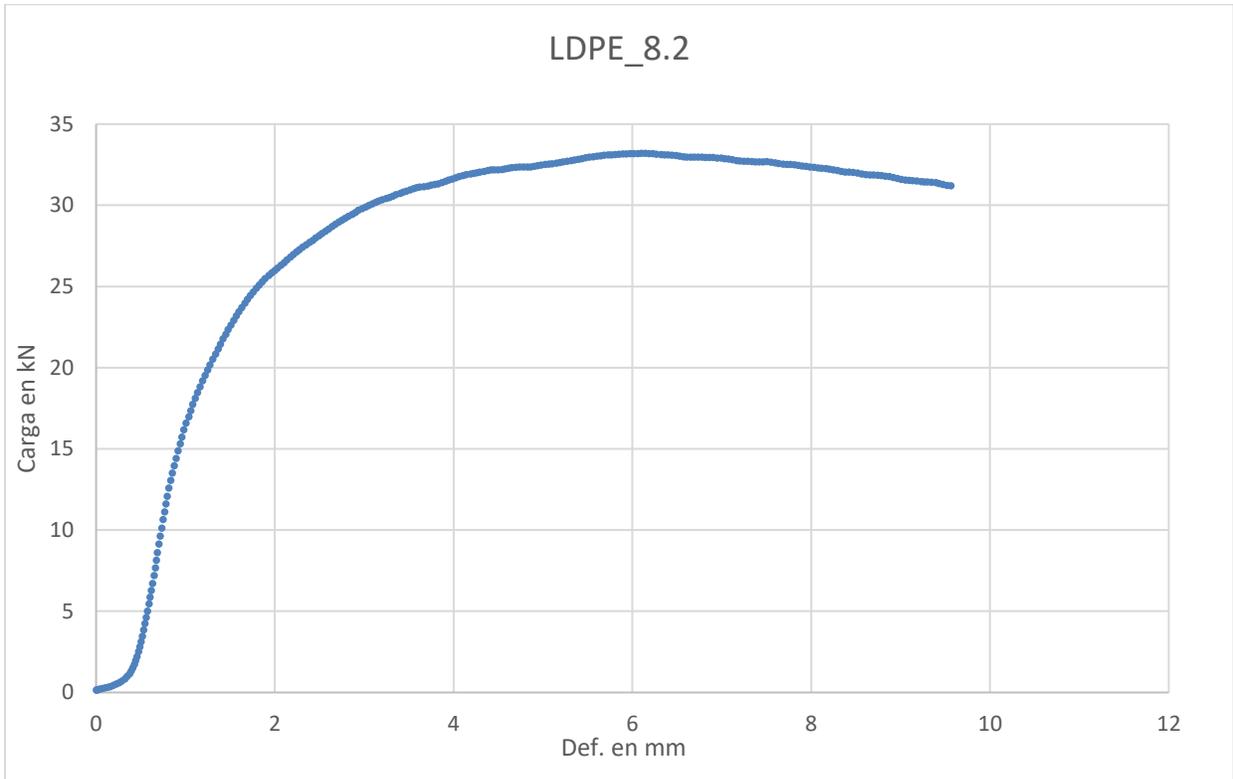


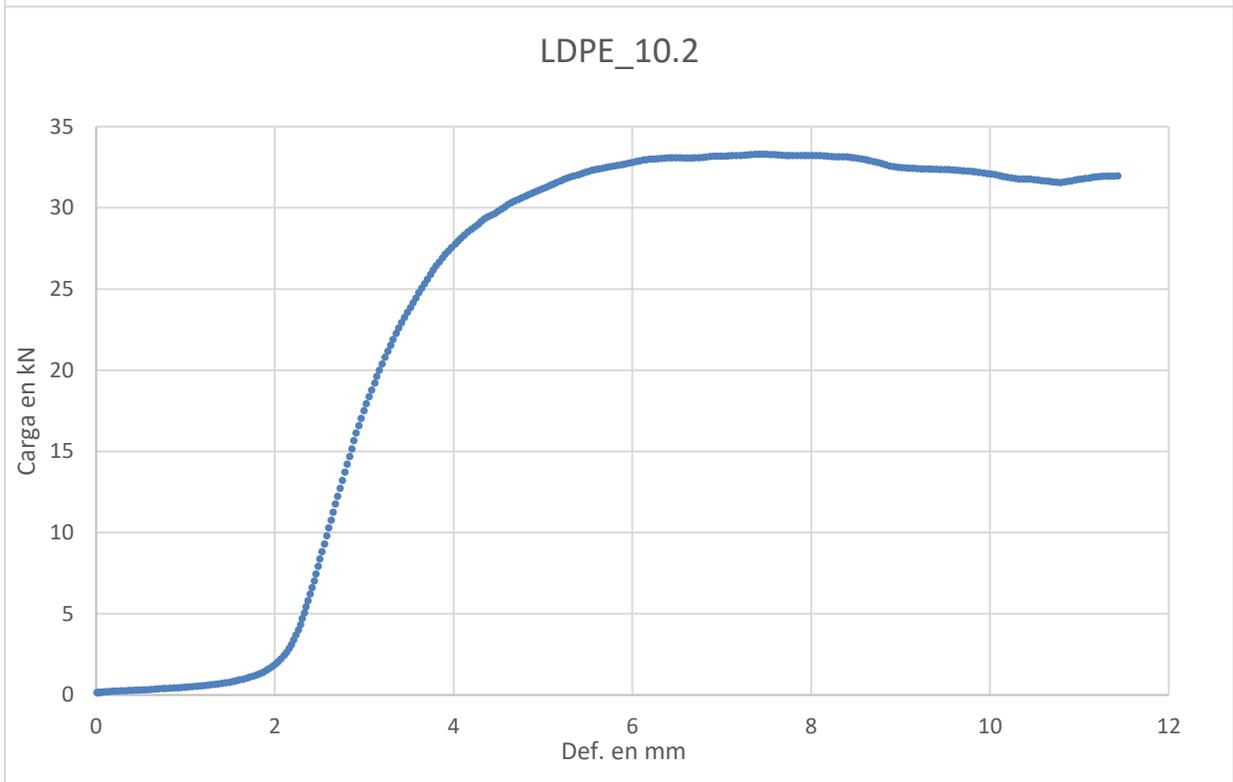
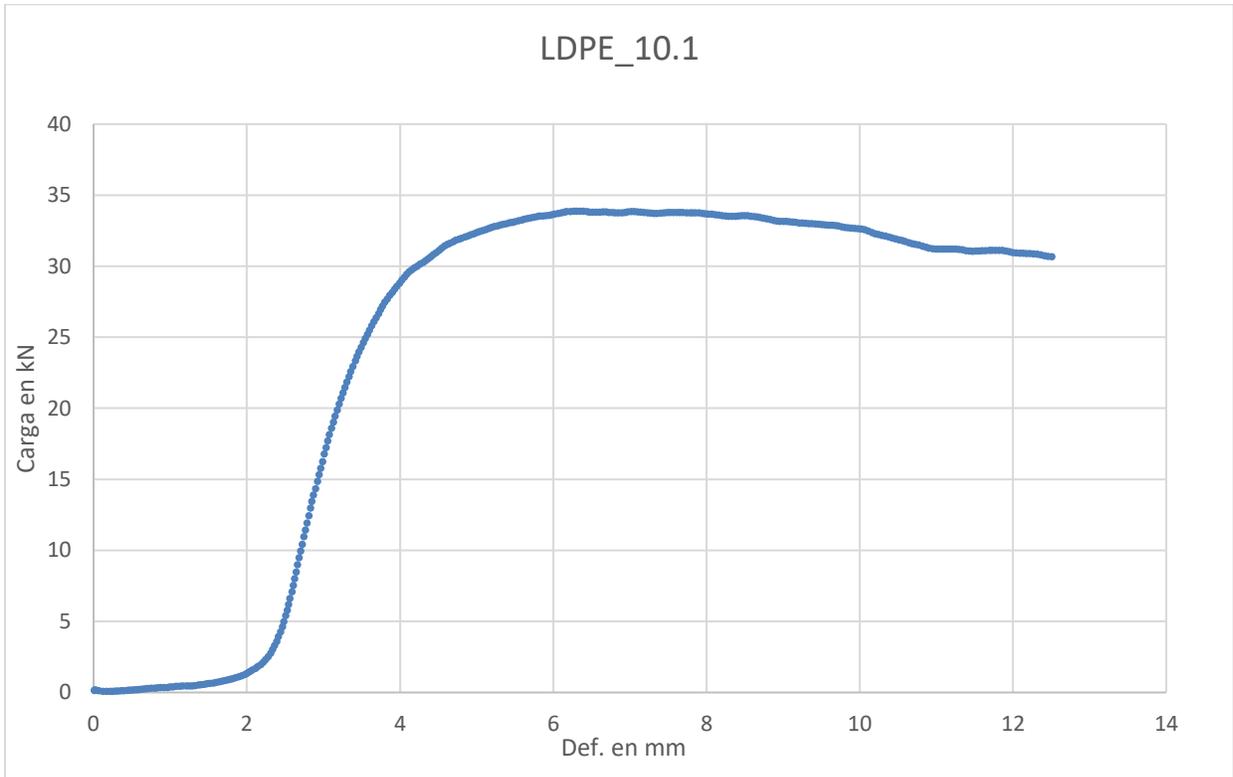
LDPE_6.3

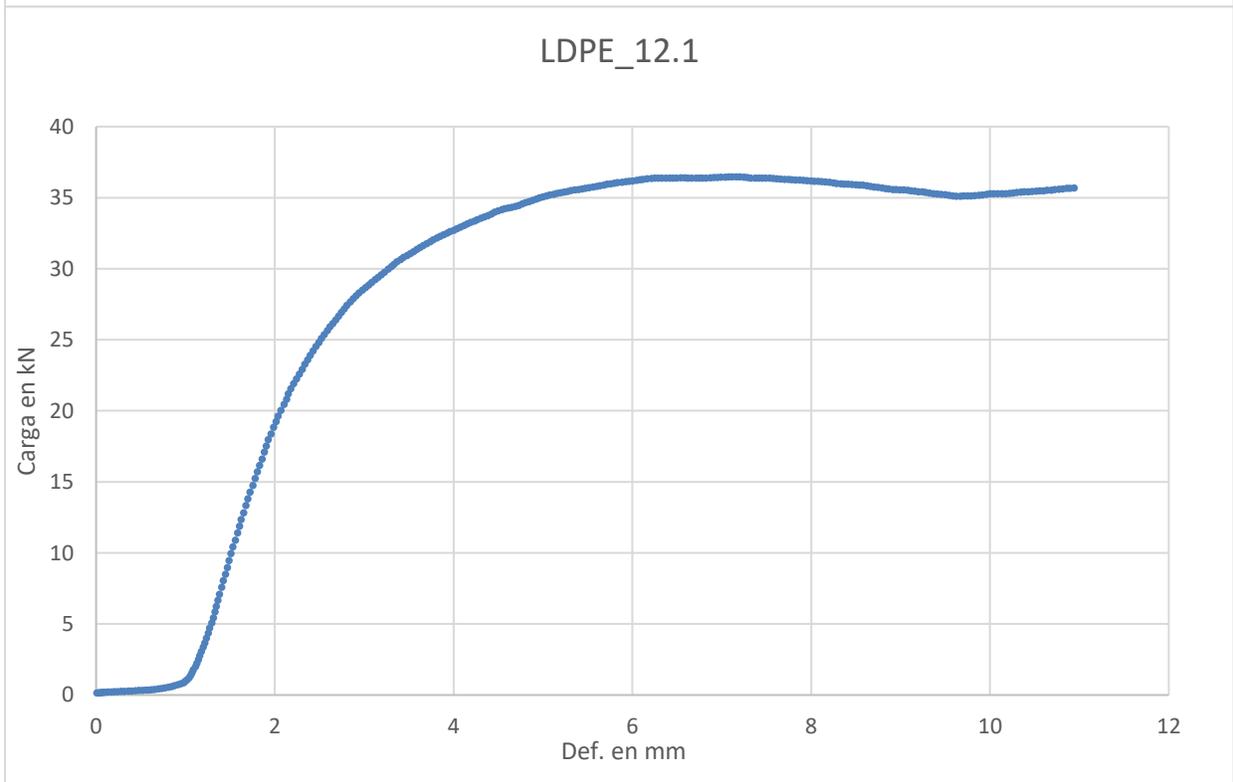
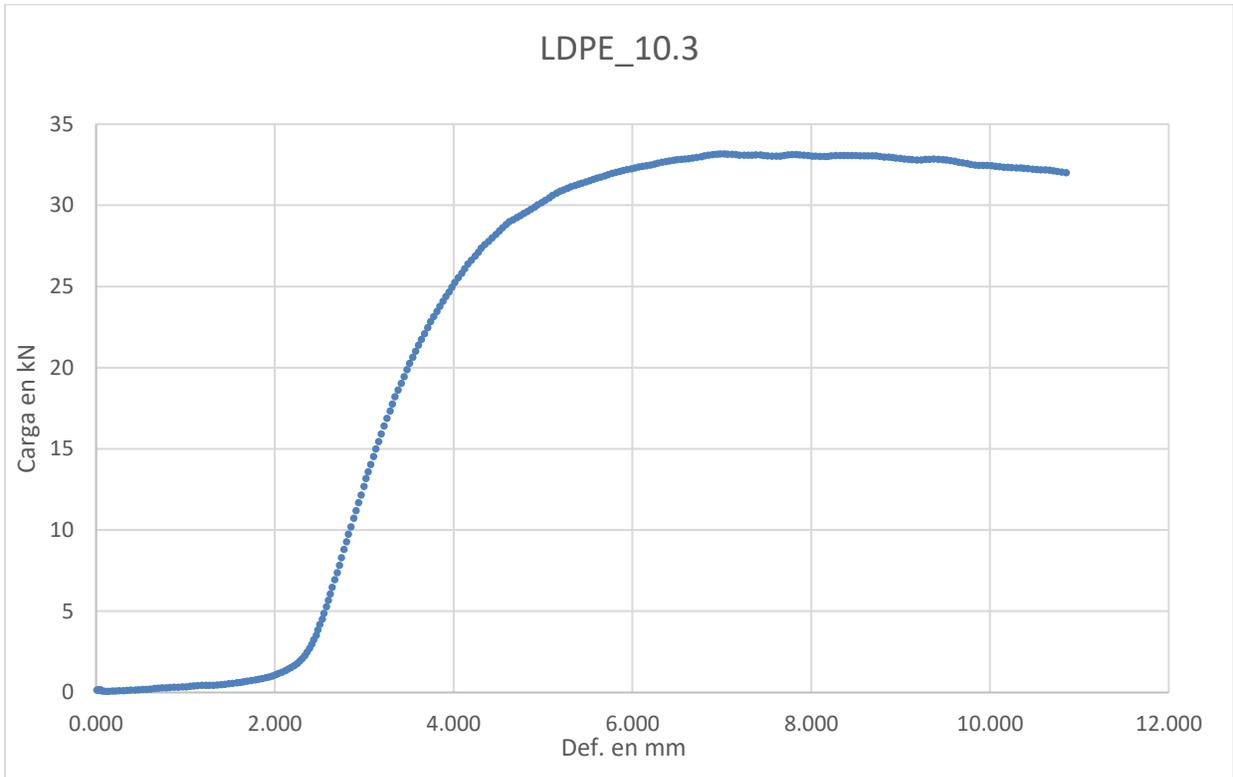


LDPE_8.1

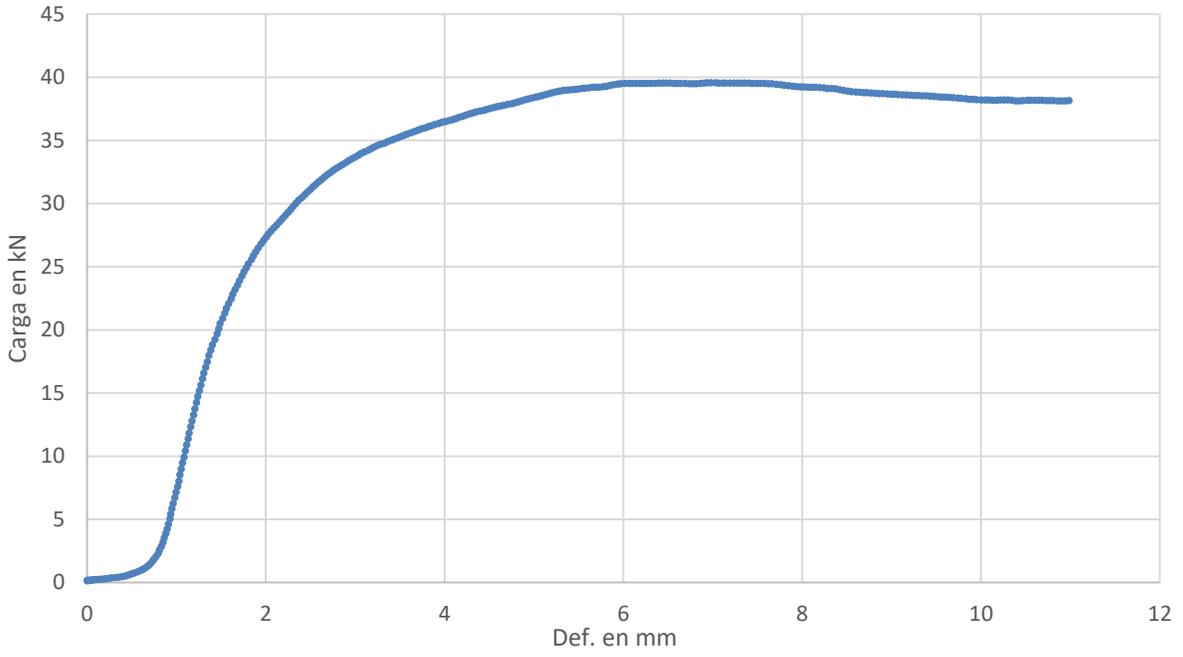




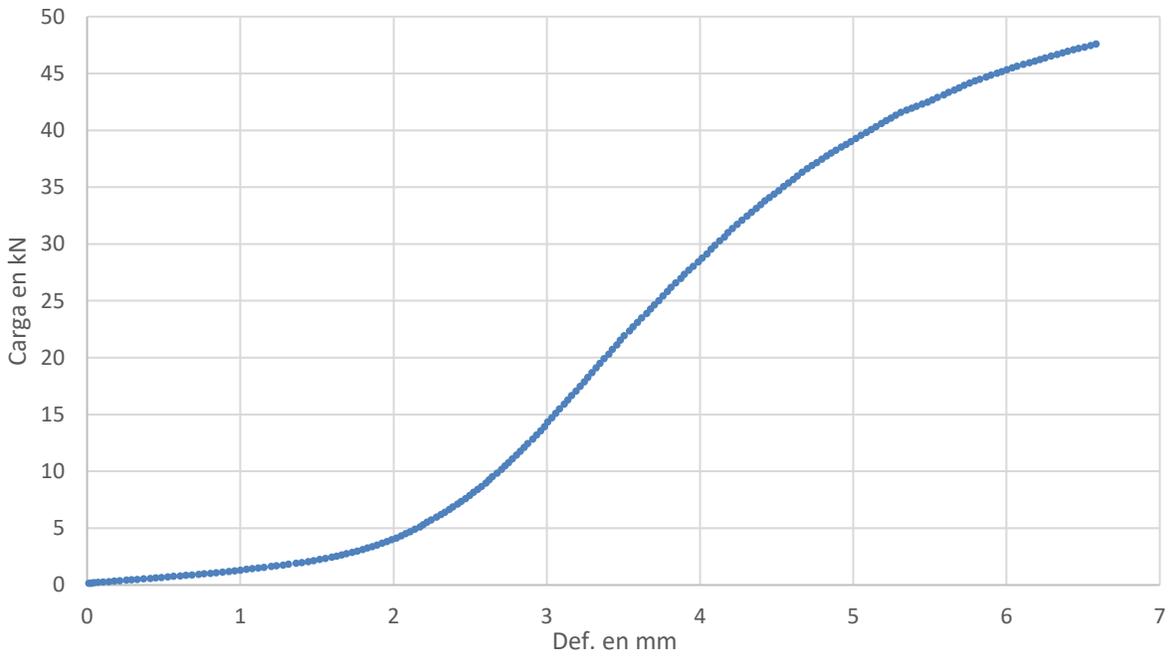


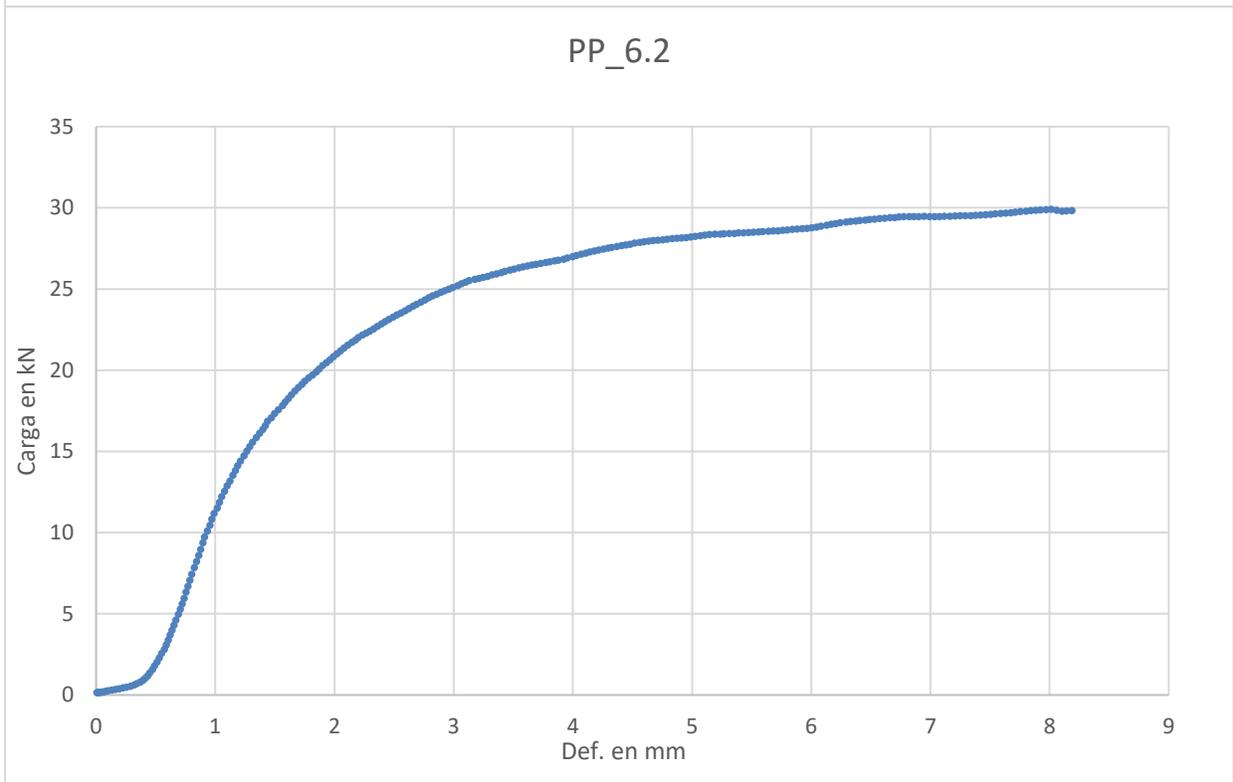
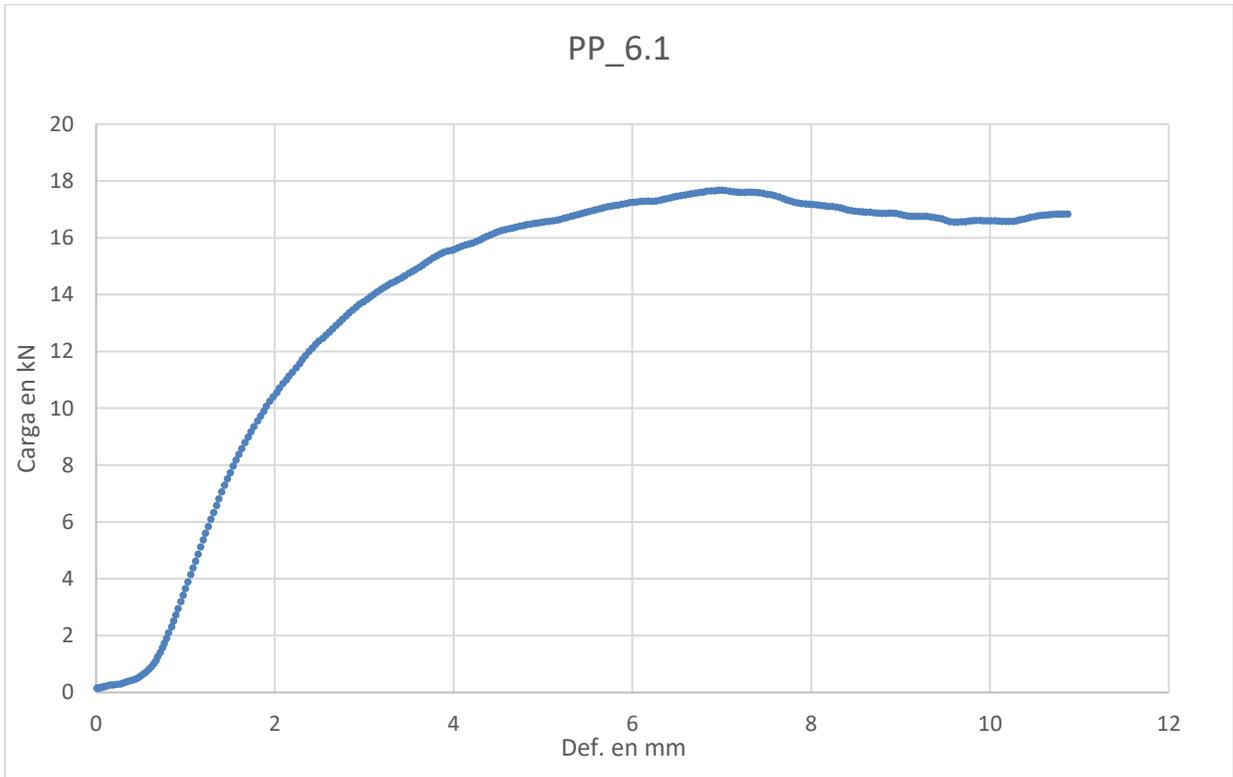


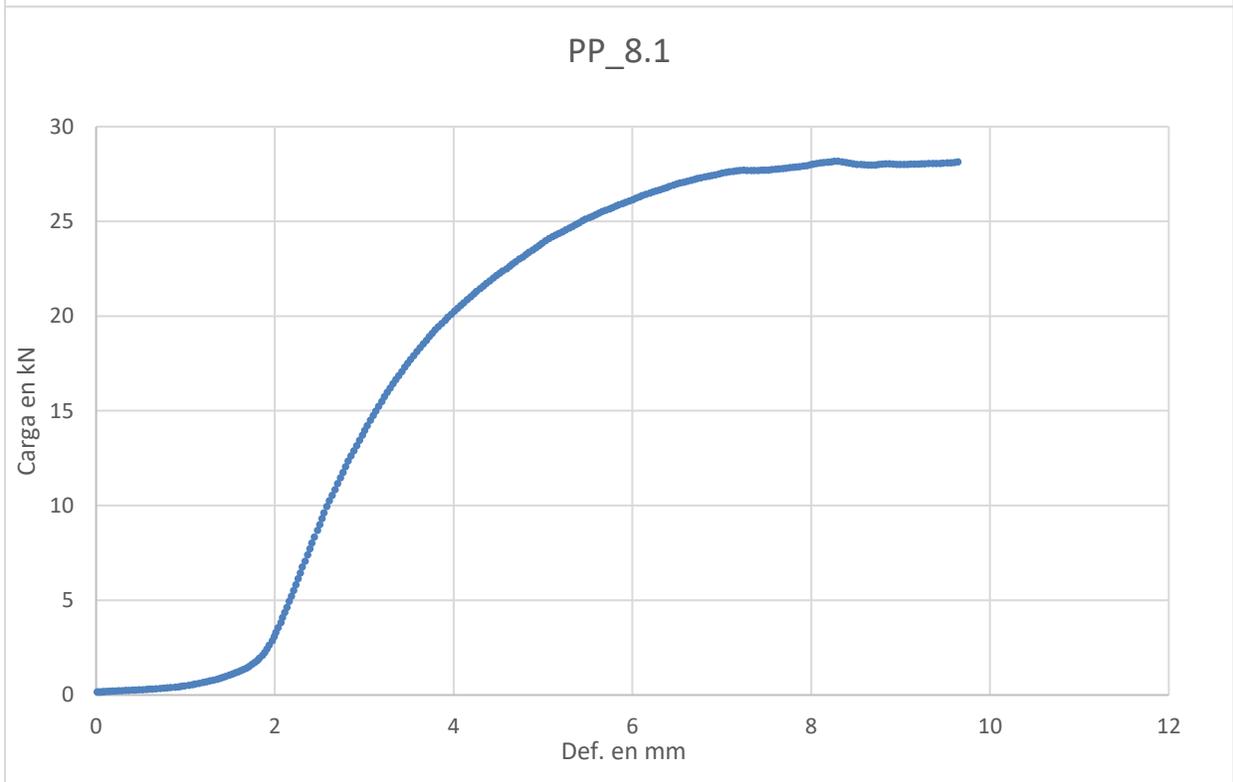
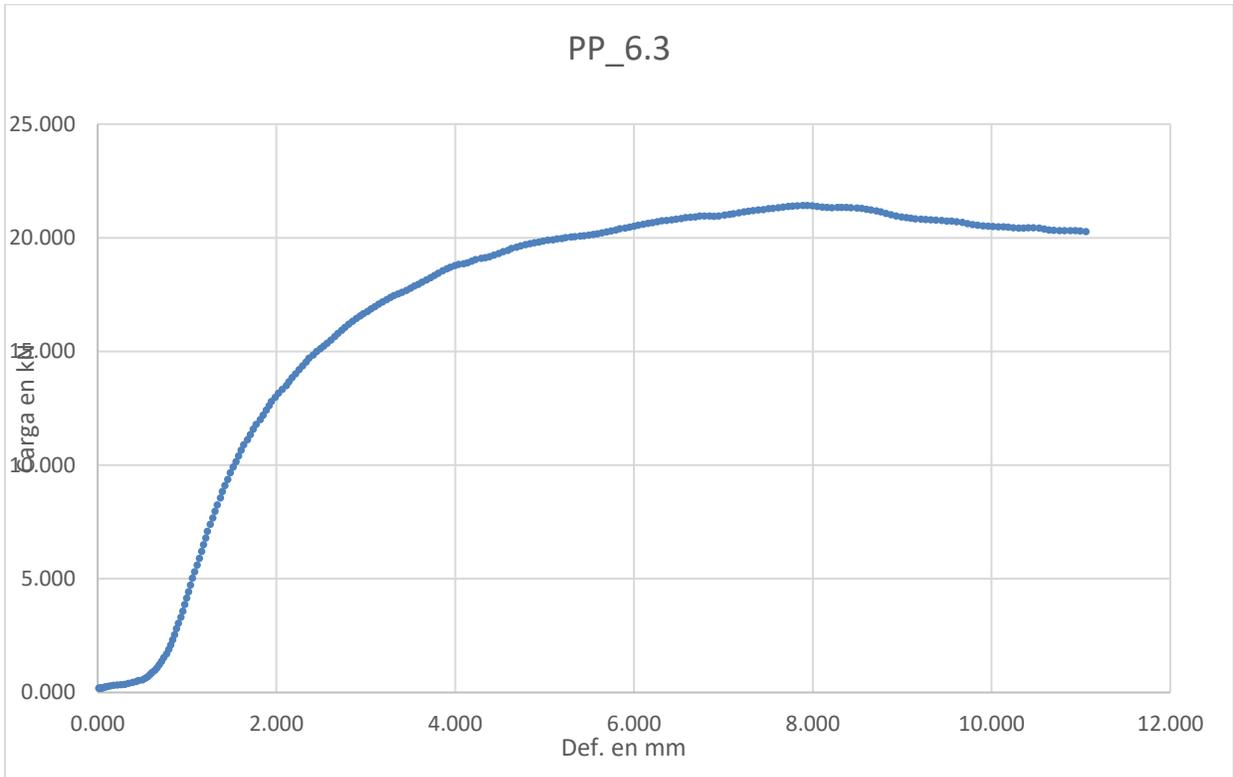
LDPE_12.2

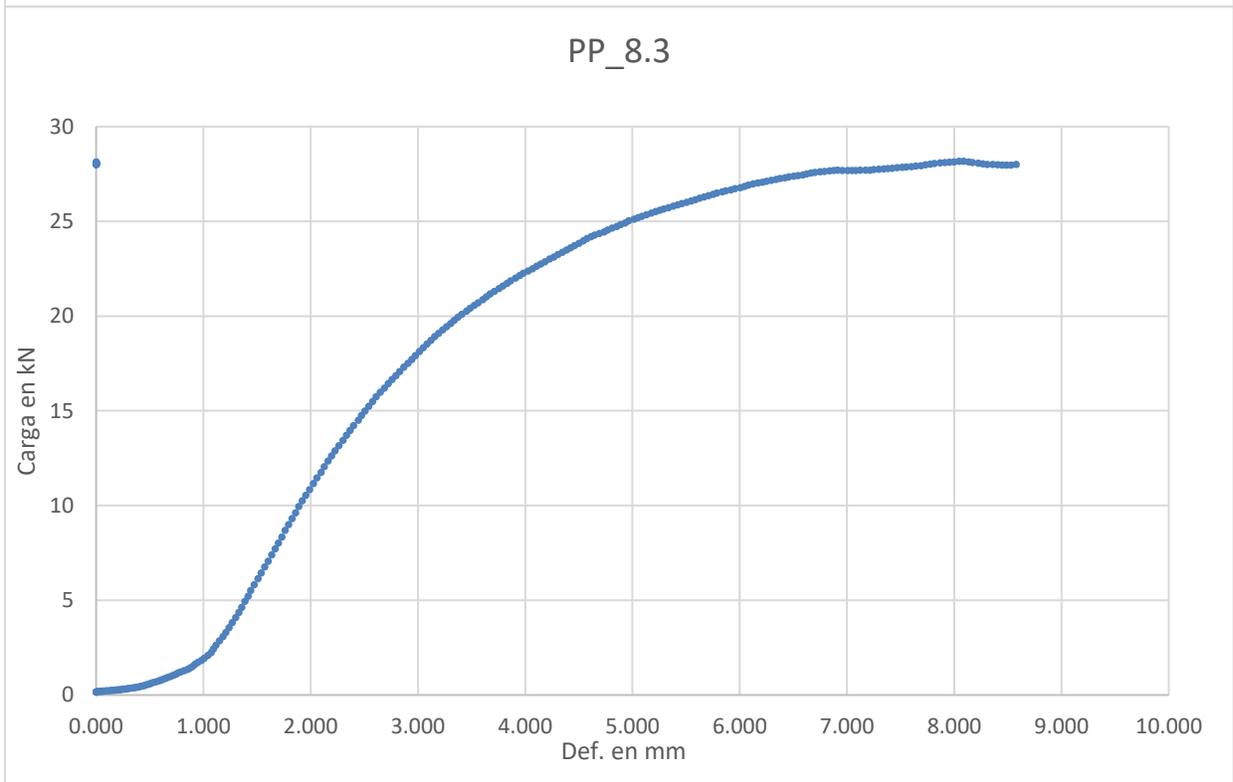
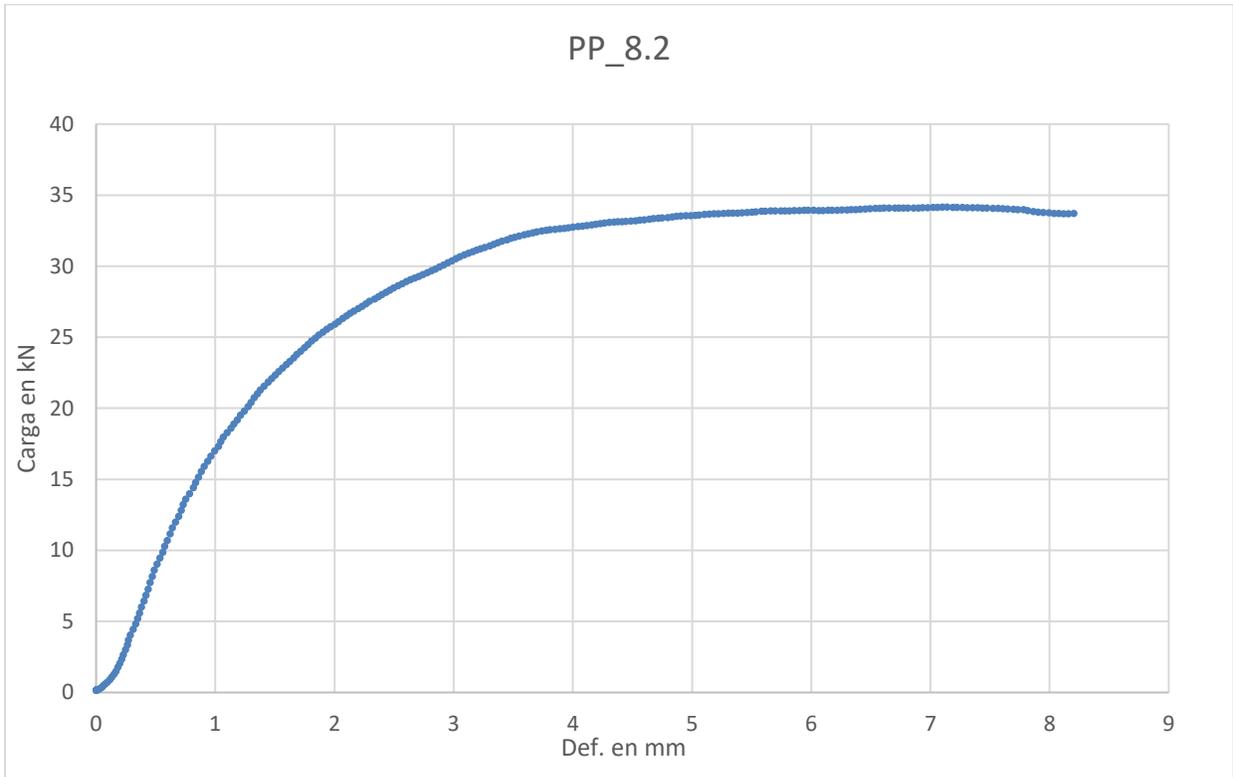


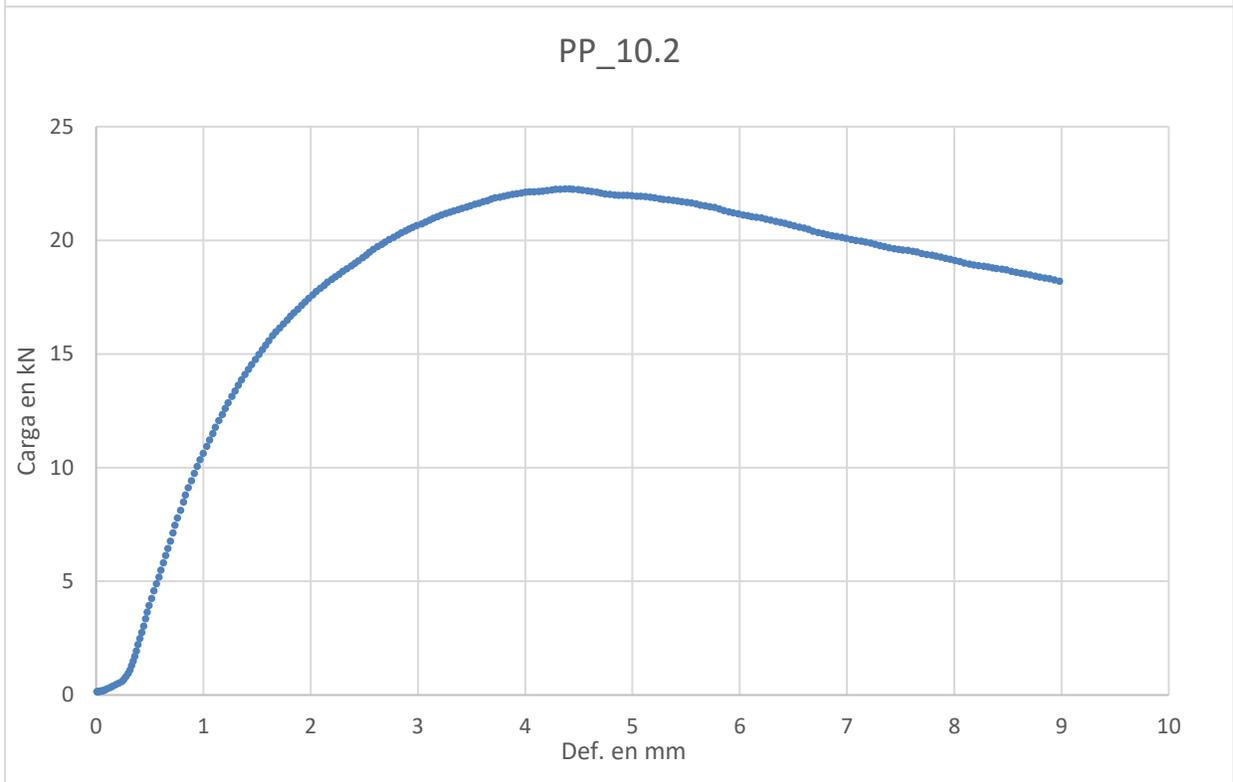
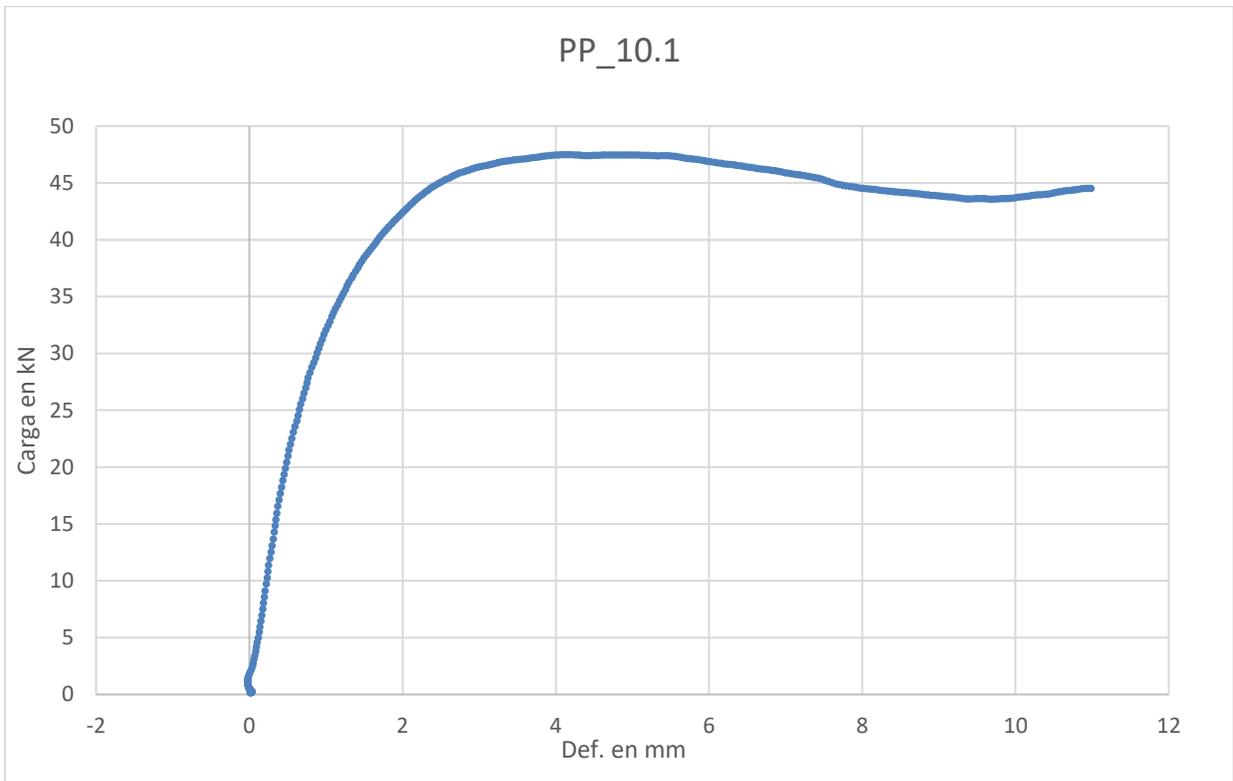
LDPE_12.3

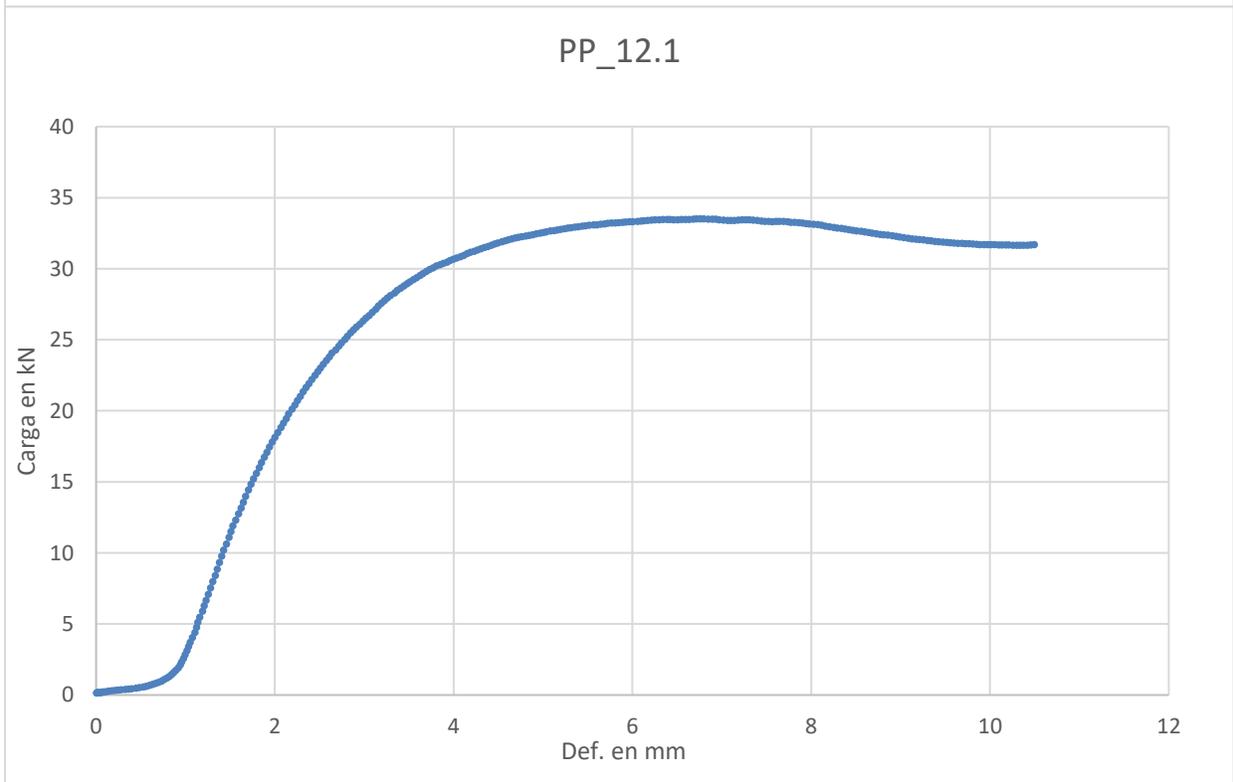
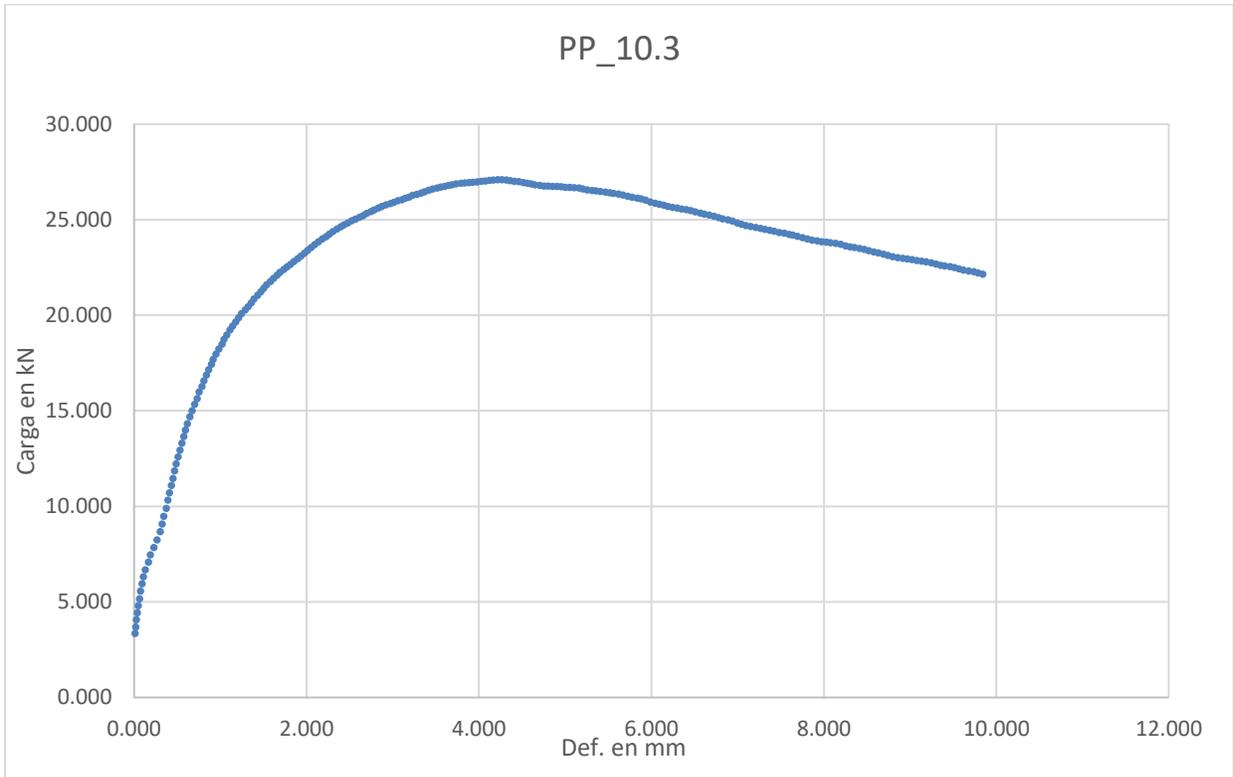


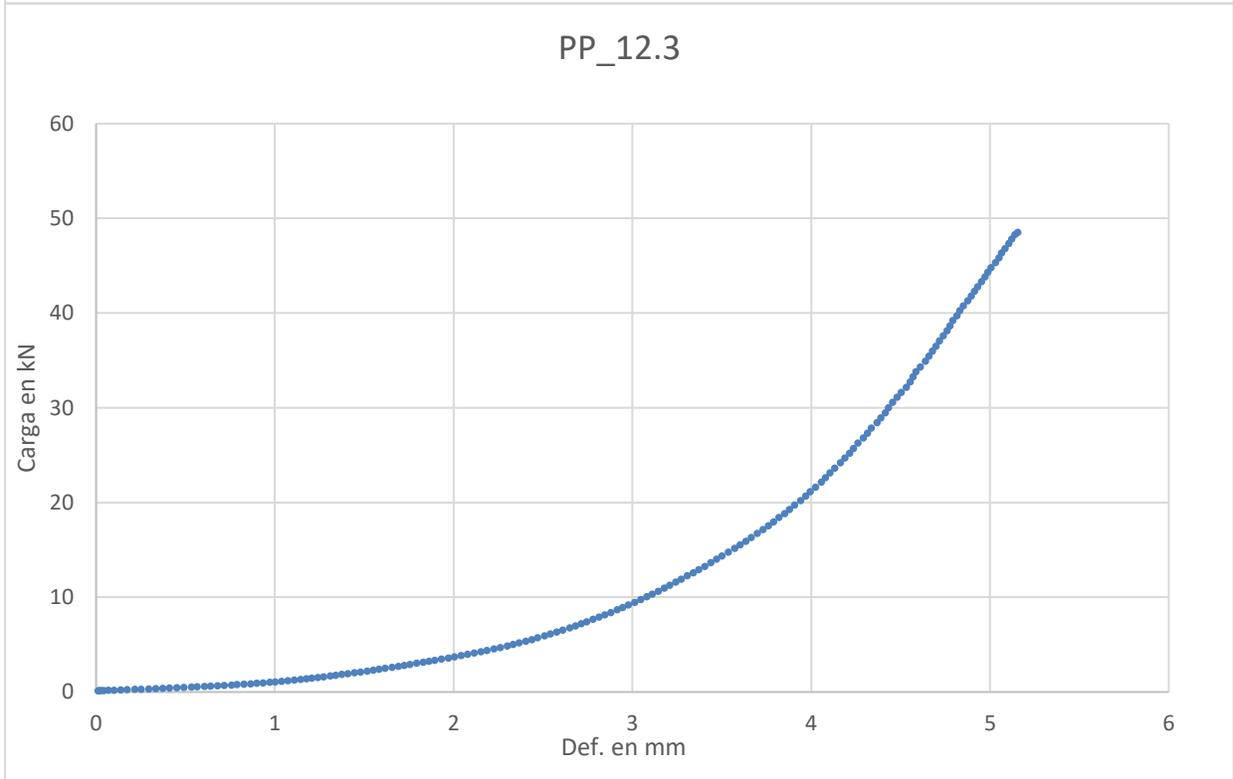
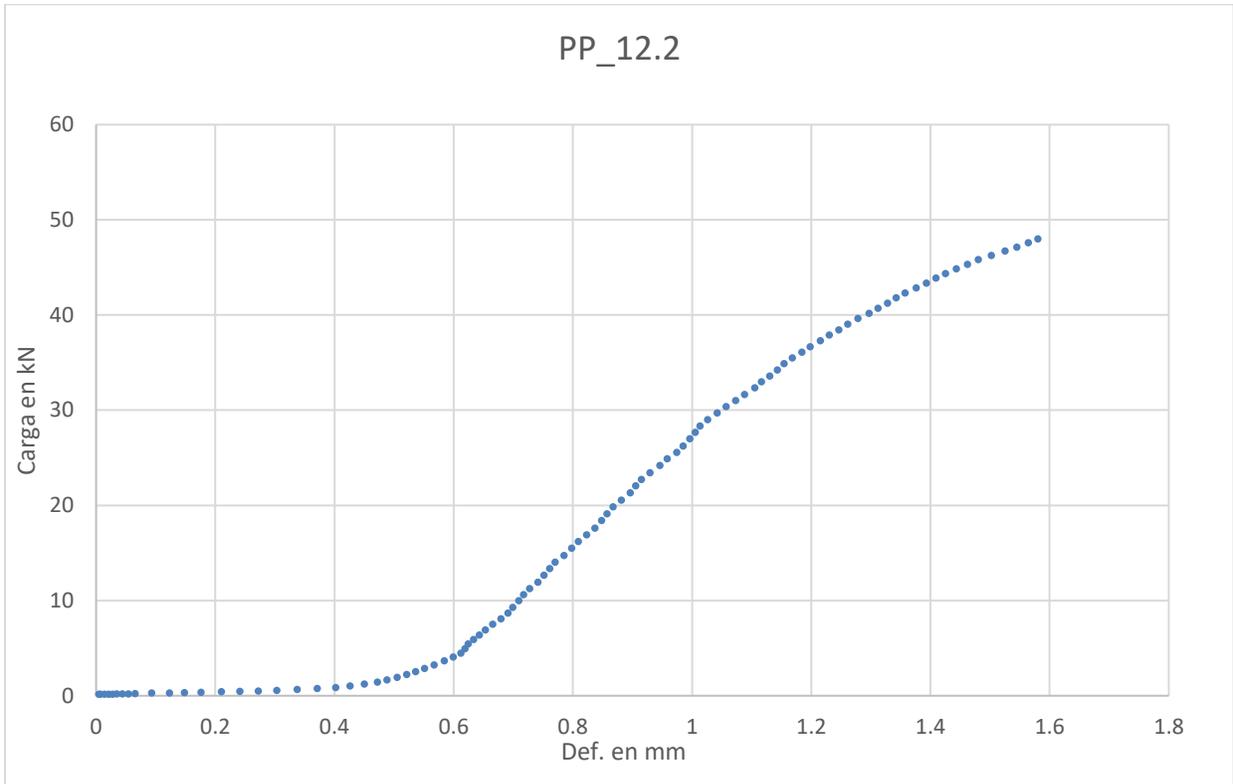


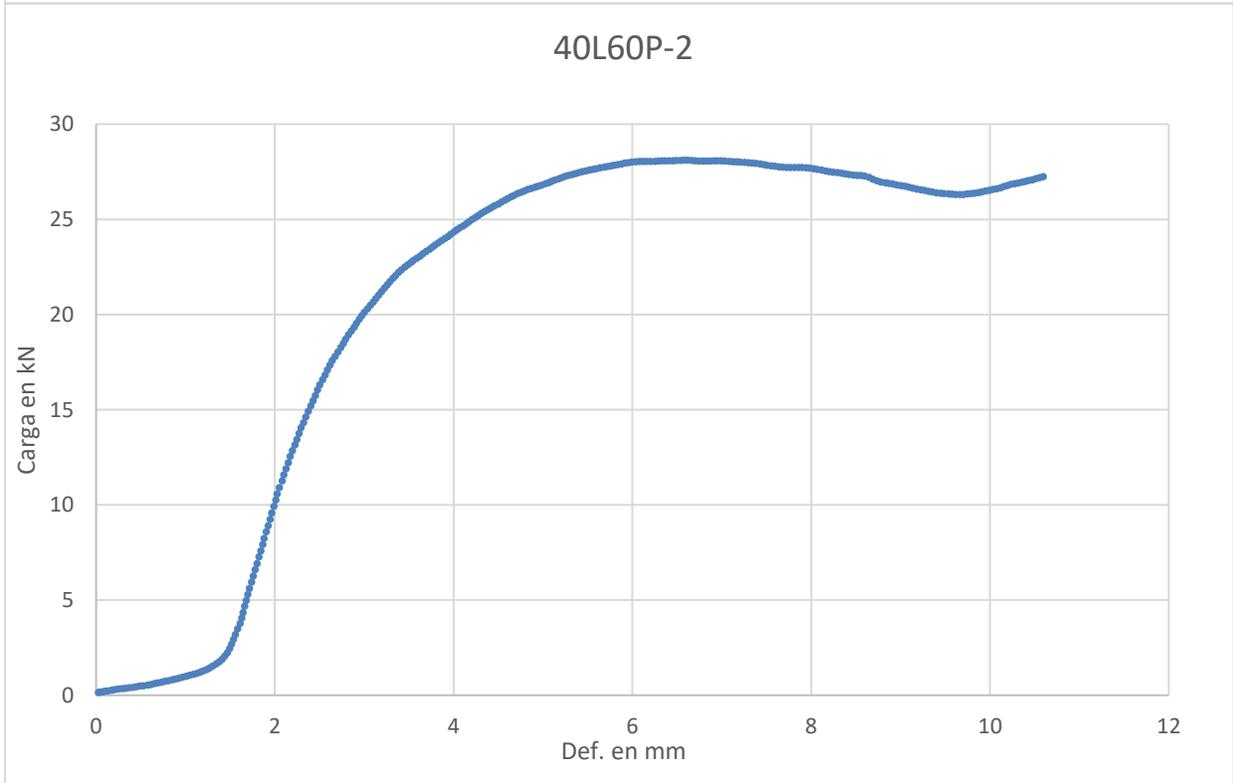
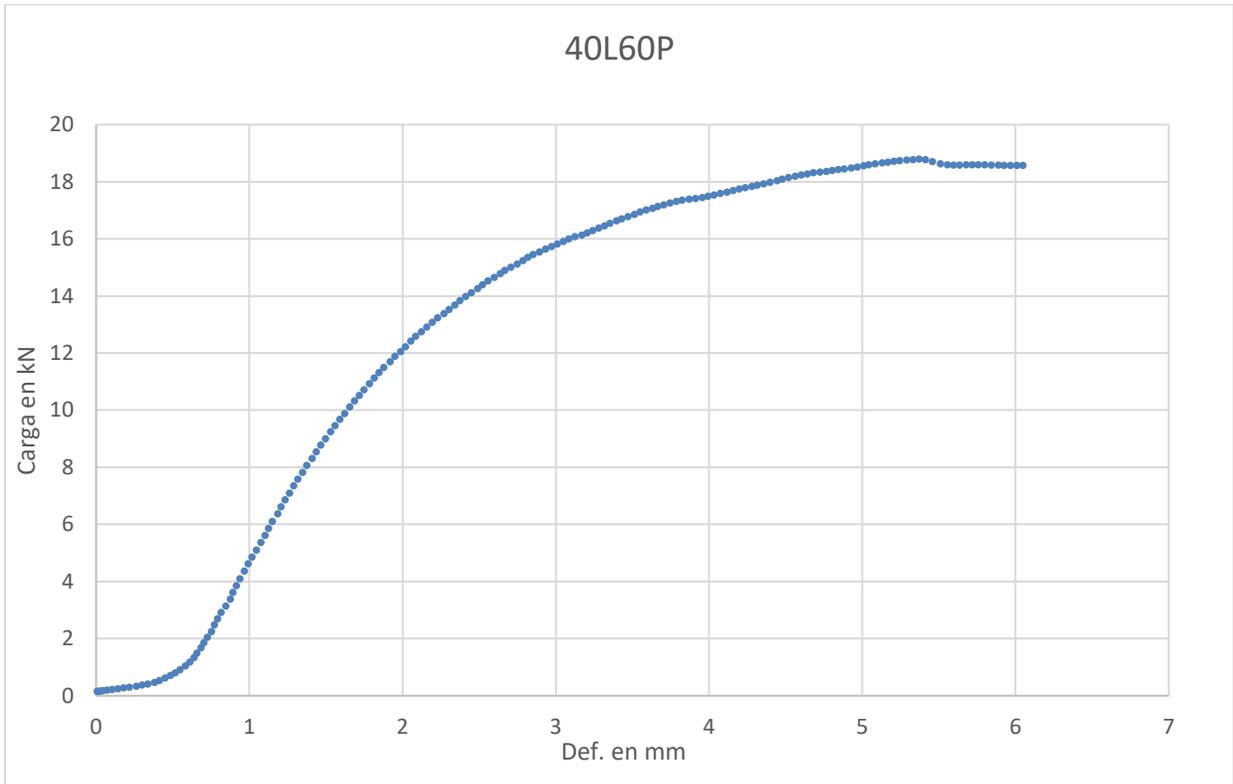




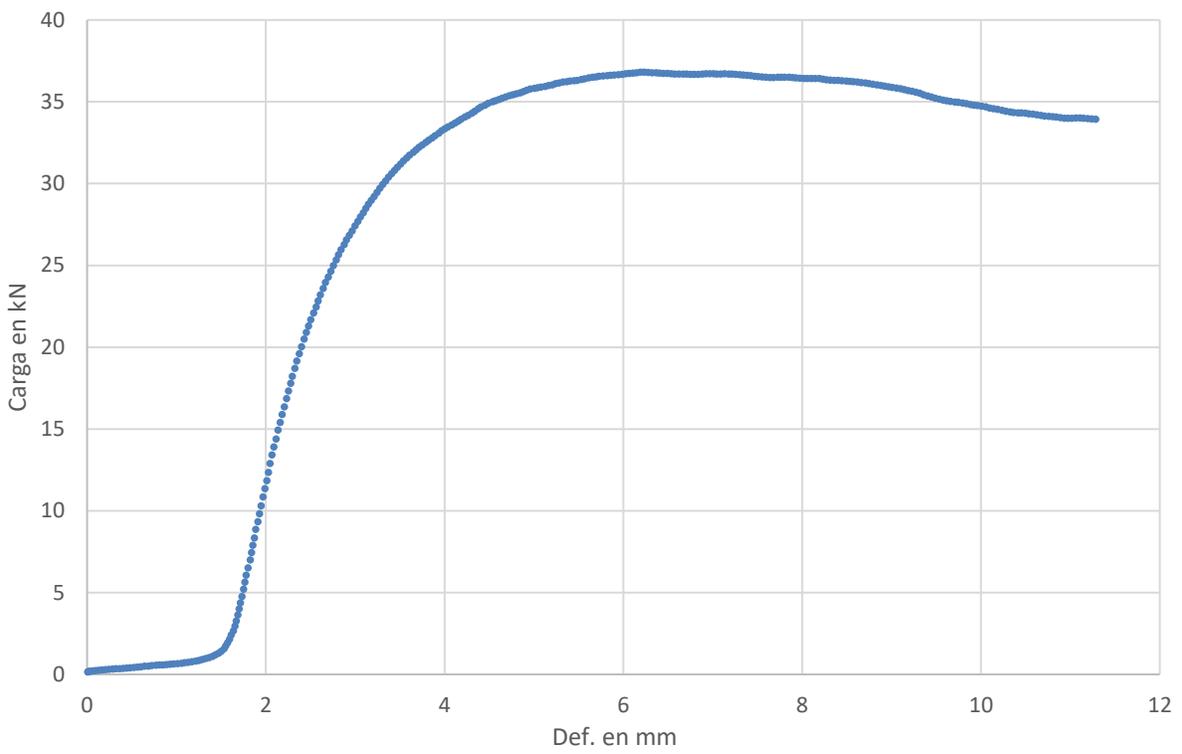




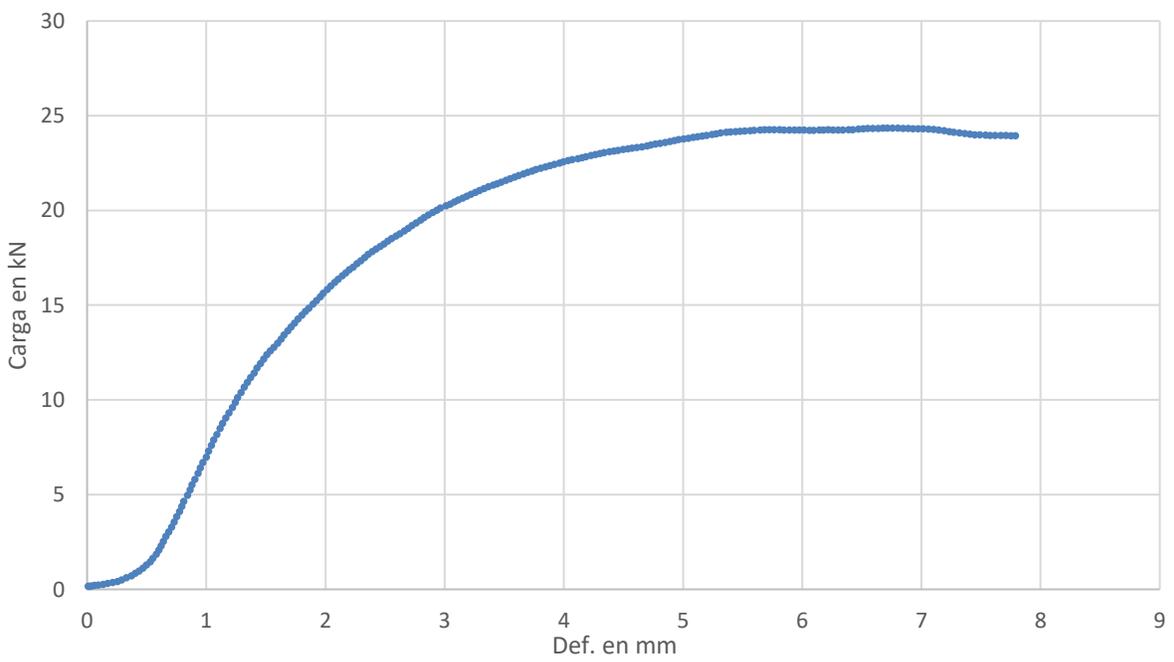


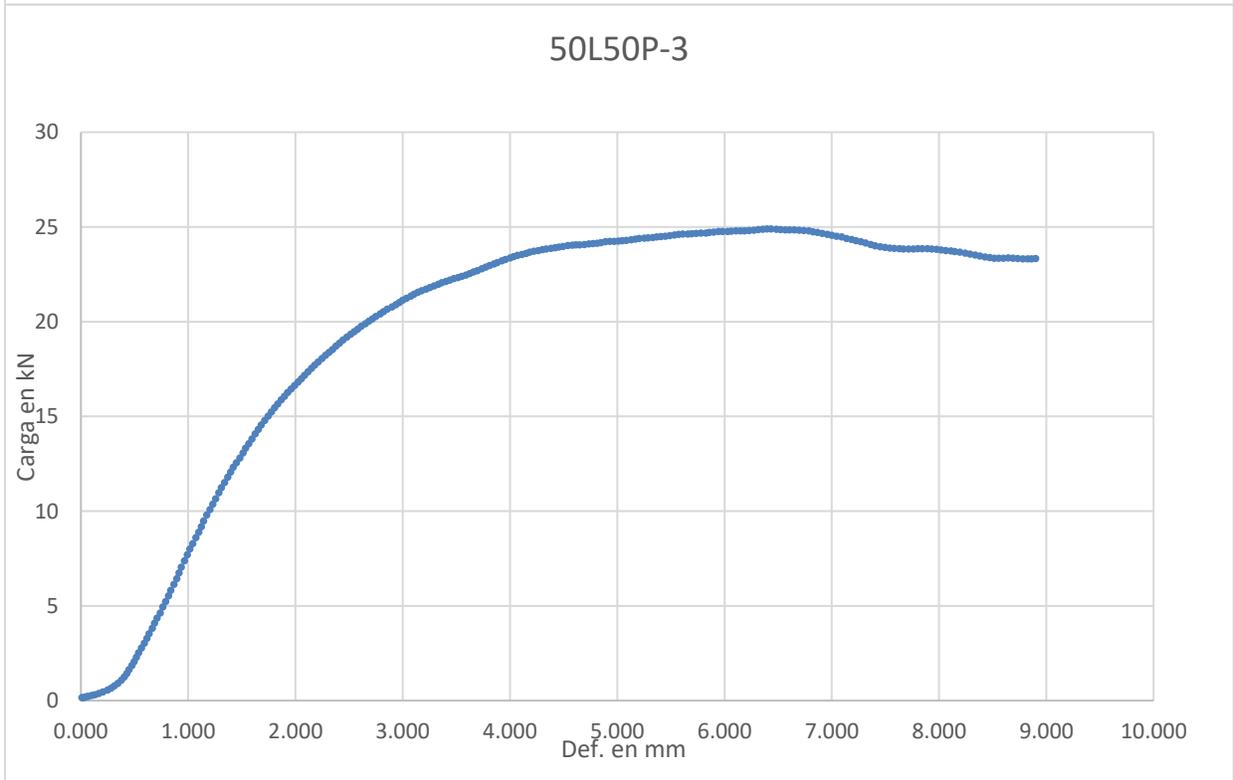
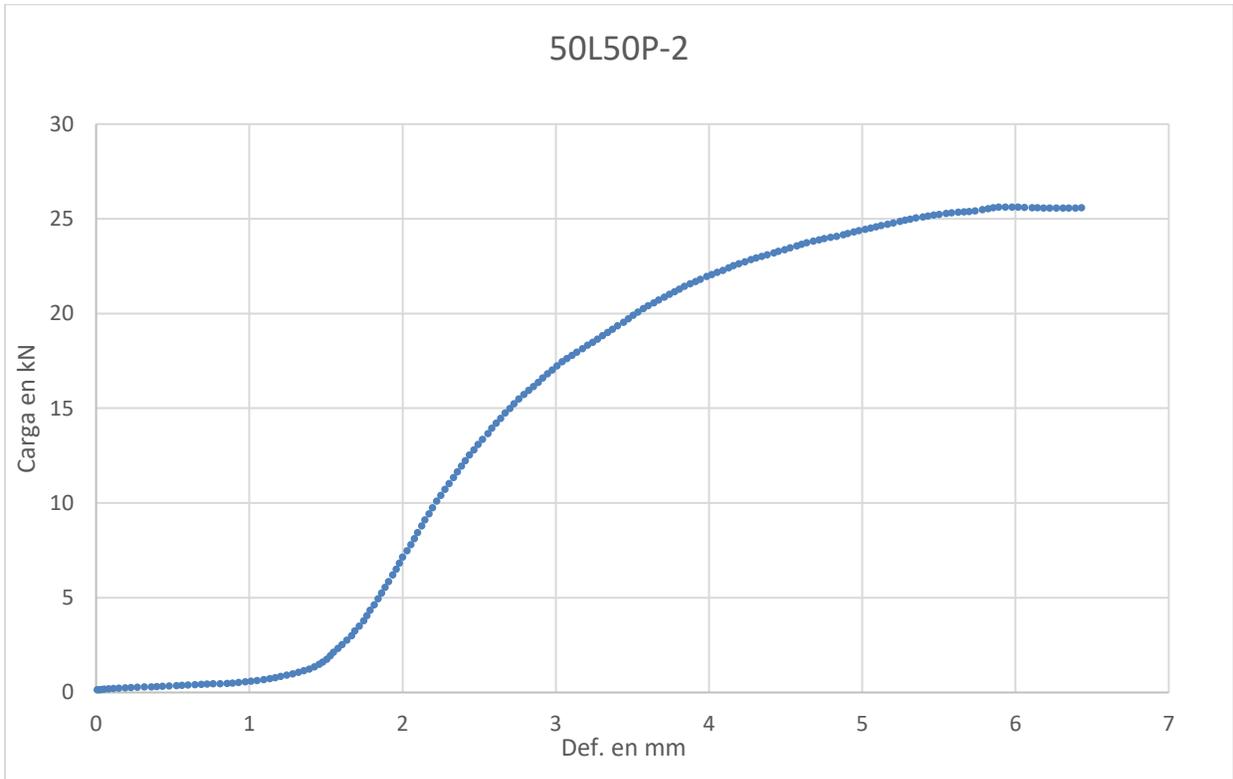


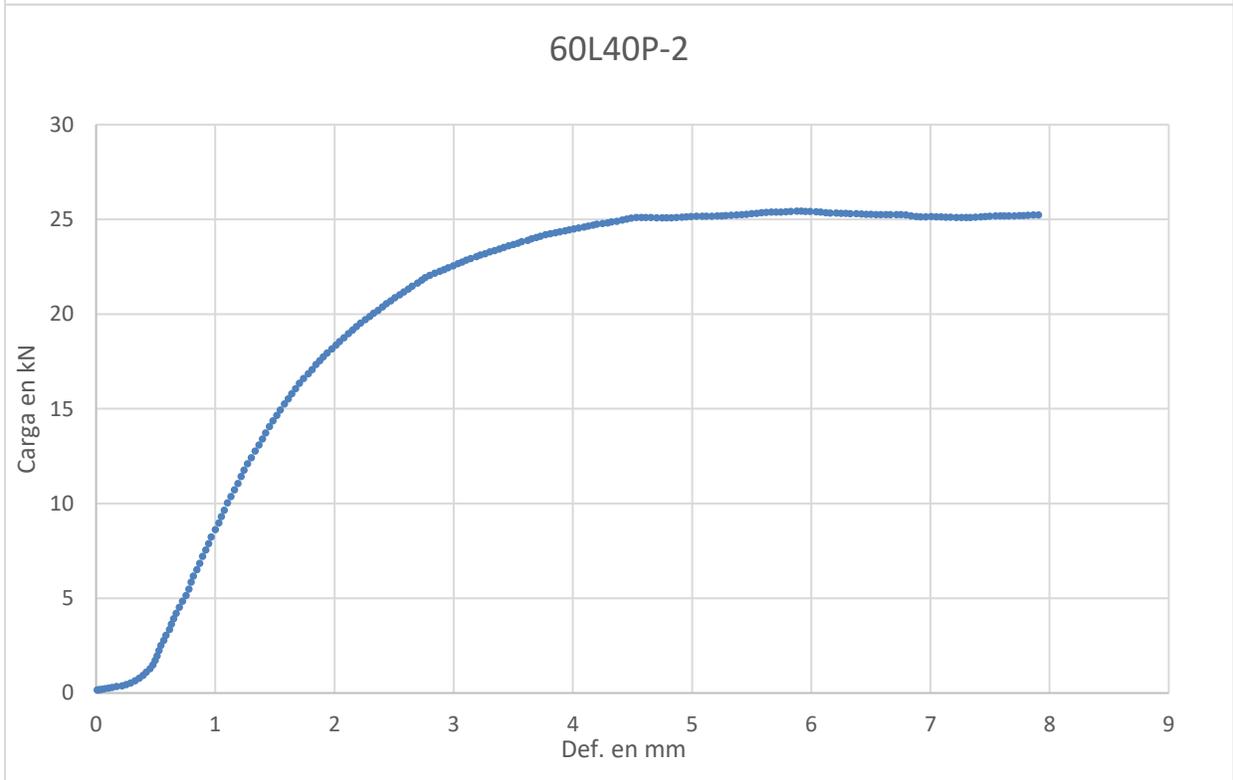
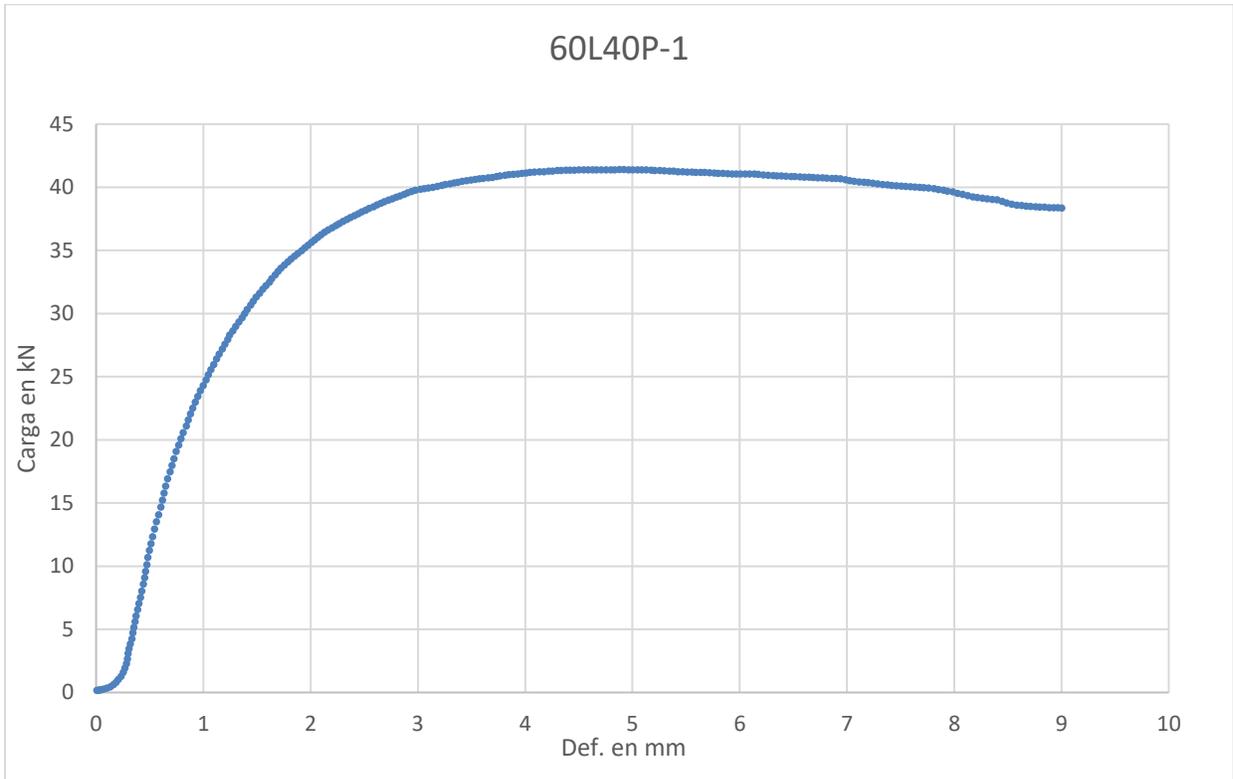
40L60P-3



50L50P-1







60L40P-3

