

2024 Factibilidad del uso de PET triturado como sustitución parcial de agregados para diseño de mezclas de pavimentos rígidos.

Ing. Flor María de los Ángeles González Porta



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

**Factibilidad del uso de PET triturado como sustitución
parcial de agregados para diseño de mezclas de pavimentos
rígidos.**

Tesis

**Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestro/Doctor en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad**

Presenta

Ing. Flor María de los Ángeles González Porta

Dirigido por:

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza

Querétaro, Qro. a 14 de noviembre del 2024

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.



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

Factibilidad del uso de PET triturado como sustitución parcial de agregados
para diseño de mezclas de pavimentos rígidos.

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de Maestro/Doctor
en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Presenta

Ing. Flor María de los Ángeles González Porta

Dirigido por:

Nombre completo del Director de Tesis

- Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza

Nombre del Sinodal Presidente

- Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza

Nombre del Sinodal Secretario

- Dr. Jaime Moisés Horta Rangel

Nombre del Sinodal Vocal

- Dr. Ricardo Montoya Zamora

Nombre del Sinodal Suplente

- M.C. Gerardo Medellín Zamora

Nombre del Sinodal Suplente

- Dra. Teresa López Lara

Centro Universitario, Querétaro, Qro.

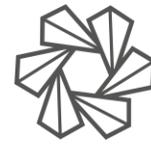
Fecha de aprobación por el Consejo Universitario (Diciembre
2024) México



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO



FACULTAD
DE INGENIERÍA



DIPFI
POSGRADO
INGENIERÍA

RESUMEN

La producción y uso de envases plásticos en el mundo conlleva consigo la problemática de su disposición final pudiendo ser ésta un peligro ambiental y visual, además la necesidad de materiales de construcción más resistentes y a menor costo es algo que la industria de la construcción siempre ha buscado, el uso de polietileno tereftalato (PET) en mezclas de concreto podría ayudar en ambas problemáticas.

Por lo anterior el siguiente trabajo de investigación tiene como objetivo la incorporación de polietileno tereftalato (PET) como parte de la granulometría convencional (gravas y arenas) de una mezcla de pavimento rígido proponiendo una incorporación en diferentes proporciones con el objetivo de mejorar las características mecánicas del concreto en compresión y tensión hasta en un 10% y obteniendo a la par una utilización de polietileno tereftalato (PET) posterior a su vida útil en el mercado. Lo anterior se realizará cuantificando este incremento por medio de pruebas en laboratorio con cilindros, para compresión y tensión indirecta en prensa, se espera así una nueva dosificación de polietileno tereftalato (PET) en pavimento rígido y logrando así más resistencia en posibles aplicaciones prácticas.

Palabras clave: PET, Polietileno tereftalato, pavimento rígido, concreto, compresión, tensión, reciclaje, triturado.



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO



FACULTAD
DE INGENIERÍA



DIPFI
POSGRADO
INGENIERÍA

SUMMARY

The production and use of plastic containers in the world entails the problem of their final disposal, which can be an environmental and visual hazard, in addition, we have the need for more resistant construction materials and at a lower cost this is something that the construction industry has always sought. , the use of polyethylene terephthalate (PET) in concrete mixes could help in both problems.

Therefore, the following research work aims to incorporate polyethylene terephthalate (PET) as part of the conventional granulometry (gravel and sand) of a mixture of rigid pavement, proposing an incorporation in different proportions with the aim of improving the mechanical characteristics of concrete in compression and tension by up to 10% and at the same time obtaining a use of polyethylene terephthalate (PET) after its useful life in the market. The above will be done by quantifying this increase through laboratory tests with cylinders and beams tested in the press, thus a new dosage of polyethylene terephthalate (PET) is expected in rigid pavement and thus achieving more resistance in possible practical applications.

Keywords: PET, polyethylene terephthalate, rigid pavement, concrete, compression, strain, recycling, crushed.



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO



FACULTAD
DE INGENIERÍA



DIPFI
POSGRADO
INGENIERÍA

DEDICATORIA

A mi amada pareja por ser mi cómplice y mi mayor apoyo, por estar a mi lado en cada paso del camino y en cada una de mis locuras. Gracias por creer en mí cuando ni yo mismo lo hacía, por tu paciencia infinita y por tu amor incondicional.



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO



FACULTAD
DE INGENIERÍA



DIPFI
POSGRADO
INGENIERÍA

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas aquellas personas que, con su apoyo y cariño, han sido fundamentales para la realización de esta tesis.

A mi pareja, gracias por tu incondicional apoyo y por estar a mi lado en los momentos más difíciles. Aun cuando estabas cansado, siempre encontraste la manera de darme ánimo y fortaleza para seguir adelante, tu ayuda tanto física como emocional ha sido invaluable para poder culminar este proyecto.

A mi mejor amigo, gracias por estar siempre dispuesto a ayudarme y por hacer posible que esta tesis se materializara, tu apoyo constante y tu disposición para colaborar en cualquier momento han sido invaluable.

A mi hermano, gracias por creer en mí y por ser una fuente constante de motivación, tu confianza en mis capacidades me ha dado el impulso necesario para superar los desafíos y alcanzar mis objetivos.



TABLA DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN.....	14-15
1.1 ANTECEDENTES.....	15-18
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	18-19
1.3 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	19-21
1.4 HIPÓTESIS, OBJETIVOS Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21-22
2. MARCO TEÓRICO.....	22
2.1 TERRAPLÉN.....	22-23
2.2 SUBRASANTE.....	23-24
2.3 SUBBASE.....	24-26
2.4 BASE HIDRÁULICA.....	27-29
2.5 PAVIMENTO RÍGIDO.....	29-30
2.6 RECICLAJE DE AGREGADOS PÉTREOS.....	31-32
2.7 RECICLAJE DE PET.....	32-37
3. METODOLOGÍA.....	37
3.1 DIAGRAMA DE METODOLOGÍA, DESCRIPCIÓN DE LAS FASES Y BUENAS PRACTICAS DE LABORATORIO.....	37-39
3.2 FASE I.....	40
3.2.1. SELECCIÓN DE BANCOS DE MATERIALES.....	40-41
3.2.2. CUARTEO DEL MATERIAL.....	41-42
3.2.3. RECOLECCIÓN DE PET EN CENTROS DE ACOPIO.....	42-43
3.2.3.1. TRITURACIÓN Y LIMPIEZA DEL PET.....	43-48
3.3. FASE II.....	48
3.3.1. CEMENTANTES.....	48-49
3.3.2. PÉTREOS.....	49
3.3.2.1. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO.....	49-56
3.3.2.2. PESO UNITARIO Y VACÍOS.....	56-59
3.3.2.3. DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA Y ABSORCIÓN.....	59-62
3.3.2.4. DESGASTE DE LOS ANGELES.....	63-65
3.3.2.5. INTEMPERISMO ACELERADO.....	65-67
3.3.2.6. DESGASTE DE LOS ANGELES.....	67-69
3.3.2.7. LIMITES DE ATTERBERG.....	69-70
3.3.2.8. MÉTODO DEL CONO DE PENETRACIÓN.....	70-73
3.3.3. DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO HIDRÁULICO CON PET EN DIFERENTES PROPORCIONES Y MEZCLA CONVENCIONAL.....	73-76
3.3.4. ENSAYOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE MEZCLAS EN FRESCO.....	76-77
3.3.4.1. DENSIDAD.....	77-78
3.3.4.2. REVENIMIENTO.....	78-79



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO



FACULTAD
DE INGENIERÍA



DIPFI
POSGRADO
INGENIERÍA

3.3.5. VACIADO EN MOLDES Y DESMOLDADO.....	80
3.3.6. CURADO DE CILINDROS.....	81
3.3.7. NEOPRENO.....	81-82
3.3.8. PRUEBAS EN CONCRETO SOLIDO.....	82
3.3.8.1. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE.....	82-86
3.3.8.2. RESISTENCIA A LA TENSIÓN DIAMETRAL.....	87-90
3.3.8.3. ABSORCIÓN.....	91-93
3.4. FASE III.....	94
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	94-100
5. CONCLUSIONES.....	100-101
6. REFERENCIAS.....	101-106
7. APÉNDICE.....	107-112



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Cantidad de botellas PET desechadas al año en México (bebidas azucaradas)...	20
Tabla 2: Tabla 2: Cantidad de botellas PET desechadas al año en México (agua embotellada).....	20
Tabla 3: Requisitos de calidad de materiales para capa subrasante.....	24
Tabla 4: Requisitos de granulometría de los materiales para subbases de pavimentos asfálticos.....	26
Tabla 5: Requisitos de calidad de los materiales para subbases de pavimentos asfálticos....	26
Tabla 6: Requisitos de granulometría de los materiales para bases de pavimentos con carpetas de concreto hidráulico.....	28
Tabla 7: Requisitos de calidad de los materiales para bases de pavimentos con carpetas de concreto hidráulico.....	29
Tabla 8: Condiciones de drenaje.....	30
Tabla 9: Componentes de las Mezclas.....	34
Tabla 10: Dosificación de mezclas.....	35
Tabla 11: Proporciones de las mezclas de concreto.....	36
Tabla 12: Proporciones de polietileno de alta densidad en las mezclas.....	37
Tabla 13: Granulometría material reciclado.....	50
Tabla 14: Granulometría material natural.....	54
Tabla 15: Valores de peso unitario y vacíos de grava y arena material natural y reciclado....	59



Tabla 16: Calculo de la cantidad de cilindros a elaborar.....75

Tabla 17: Cantidad de material necesario para cada tipo de mezcla en revoladora.....76

Tabla 18: Dosificación de materiales para cada tipo de mezcla.....76

Tabla 19: Valores de pesos unitarios de las distintas mezclas de concreto.....78

Tabla 20: Resultados de los revenimientos de las distintas mezclas.....79

Tabla 21: Valores obtenidos de compresión a 14 y 28 días de las diferentes mezclas...85

Tabla 22: Valores obtenidos de tensión a 14 y 28 días de las diferentes mezclas.....89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Metodología general del proyecto.....37

Figura 2: Ubicación “corporativo Abraham González” obra Blvd de la Nación.....40

Figura 3: Ubicación “Reurba”.....40

Figura 4: Vista en sitio del banco.....41

Figura 5: Secado del material, equipo de cuarteo y realización del mismo.....42

Figura 6: Centro de acopio BaskPET Ball.....43

Figura 7: Botellas PET.....44

Figura 8: Etiquetas de botellas PET.....44

Figura 9: Cuellos de botellas y etiquetas botellas PET.....45

Figura 10: Vaso de licuadora fracturado.....45

Figura 11: Botellas PET limpias cortadas a la mitad, sin boca ni fondo.....46

Figura 12: Fragmentos triturado de botellas PET.....47

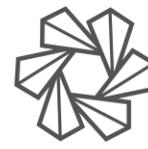


Figura 13: Etiqueta botella 100% reciclable.....	47
Figura 14: Motor de licuadora dañado.....	48
Figura 15: Especificación NMX-C-414-ONNNCCE cemento.....	49
Figura 16: Juego de mallas.....	49
Figura 17: Material reciclado costal 1 obtenido de cada malla.....	51
Figura 18: Material reciclado costal 2 obtenido de cada malla.....	52
Figura 19: Material reciclado costal 3 obtenido de cada malla.....	53
Figura 20: Material natural obtenido de cada malla.....	55
Figura 21: Curvas granulométricas materiales reciclados y material natural.....	56
Figura 22: Mediciones de peso unitario y vacíos de grava y arena material natural...	57
Figura 23: Mediciones de peso unitario y vacíos de grava y arena material reciclado...	58
Figura 24: Parte del proceso de obtención de densidad, densidad relativa y absorción...	60
Figura 25: Procedimiento cálculo de densidad, densidad relativa y absorción material natural.....	61
Figura 26: Procedimiento cálculo de densidad, densidad relativa y absorción material reciclado.....	62
Figura 27: Equipo para prueba de desgaste de los Ángeles.....	63
Figura 28: Material para prueba de desgaste de los Ángeles.....	64
Figura 29: Mallas, lavado y pesado del material después de la prueba del desgaste de los Ángeles.....	64



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO



FACULTAD
DE INGENIERÍA



DIPFI
POSGRADO
INGENIERÍA

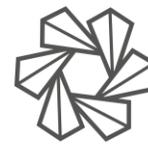
Figura 30: Material reciclado en uno de los ciclos de secado de la prueba de Intemperismo.....	66
Figura 31: Maquinaria para la prueba de desgaste micro-deval.....	67
Figura 32: Bolas de acero, mallas y maquinaria para el desgaste micro-deval....	68
Figura 33: Pesado de material reciclado antes y después del secado.....	69
Figura 34: Intento de prueba de Copa de Casagrande.....	70
Figura 35: Valores de penetración (mm) material natural.....	71
Figura 36: Contenido de humedad de las distintas penetraciones (gr).....	71
Figura 37: Valores de penetración (mm) material reciclado.....	72
Figura 38: Contenido de humedad de las distintas penetraciones (gr), material reciclado.....	73
Figura 39: Resultados de Limite líquido, límite plástico e índice plástico en material natural y reciclado.....	73
Figura 40: Moldes de 10x20 usados para los cilindros.....	74
Figura 41: Revolvedora ocupada en la elaboración de todas las mezclas.....	75
Figura 42: Densidad del concreto de las diferentes mezclas.....	77
Figura 43: Mediciones de revenimiento de las distintas mezclas.....	79
Figura 44: Distintas mezclas en su molde y textura de desmoldado.....	80



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO



FACULTAD
DE INGENIERÍA



DIPFI
POSGRADO
INGENIERÍA

Figura 45: Distintos cilindros en proceso de curado.....81

Figura 46: Empaques de neopreno.....82

Figura 47: Cilindros ensayados a compresión, 14 días.....83

Figura 48: Cilindros ensayados a compresión, 28 días.....84

Figura 49: Interpretación gráfica de los resultados obtenidos de compresión simple.....86

Figura 50: Cilindros ensayados a tensión, 14 días.....87

Figura 51: Cilindros ensayados a tensión, 14 días.....88

Figura 52: Interpretación gráfica de los resultados obtenidos de tensión diametral.....90

Figura 53: Maquina de corte, proceso del corte y marcado de las pastillas.....91

Figura 54: Procesos de secado, saturado, hervido e inmersión de las pastillas.....92

Figura 55: Pastillas de las diferentes mezclas y su marcado.....93

Figura 56: Granulometría de los diferentes pétreos con límites máximos y mínimos de subbase y base hidráulica.....95

Figura 57: Valores medios de absorción de los principales tipos de rocas.....96

Figura 58: Gráfica de valores de compresión promedios a 14 y 28 días.....97

Figura 59: Gráfica de valores de tensión promedios a 14 y 28 días.....98

Figura 60: Empalme de resultados de distintas pruebas.....99

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Formula para el cálculo del desgaste de los Ángeles.....65

Ecuación 2: Formula para el cálculo del intemperismo.....66

Ecuación 3: Formula para el cálculo del desgaste micro-Deval.....67



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO



FACULTAD
DE INGENIERÍA



DIPFI
POSGRADO
INGENIERÍA

1. INTRODUCCIÓN

La presente tesis aborda un tema de gran relevancia tanto social como científica: el uso del polietileno tereftalato (PET) reciclado en la mezcla de concreto para pavimentos rígidos. El PET, un plástico ampliamente utilizado en el consumo cotidiano, representa un desafío ambiental significativo debido a su difícil descomposición y su abundante presencia en los residuos sólidos urbanos. A pesar de los esfuerzos por reciclar este material, se estima que un porcentaje reducido del plástico fabricado a nivel mundial se recicla efectivamente, lo que genera impactos negativos en el medio ambiente, como la contaminación de suelos y cuerpos de agua. En este sentido, la incorporación del PET en la construcción de concreto emerge como una estrategia potencial para mitigar estos problemas, promoviendo la reutilización de este material y mejorando las propiedades del concreto utilizado en infraestructuras.

El objetivo de esta tesis es analizar el comportamiento de mezclas de concreto en las que se sustituye parcialmente el agregado fino y grueso por PET reciclado, evaluando su impacto en la resistencia a compresión y tensión. Esta investigación se justifica por la necesidad urgente de desarrollar soluciones más sostenibles en la construcción, un sector que consume grandes cantidades de recursos naturales. La integración del PET no solo tiene el potencial de reducir la acumulación de plásticos en vertederos, sino también de mejorar las características mecánicas del concreto, como su durabilidad, lo que podría contribuir a la creación de pavimentos más eficientes y resistentes.

En los capítulos siguientes, se detallan los antecedentes de investigaciones previas que han explorado el uso de PET en concretos, tanto en agregados finos como gruesos, así como las metodologías empleadas para determinar las proporciones óptimas de PET en las mezclas. Se abordarán los resultados obtenidos en términos de resistencia, durabilidad y comportamiento frente a cargas, basándose en estudios previos y en experimentos realizados en este trabajo. Asimismo, se discutirán las implicaciones de estas investigaciones en la construcción de pavimentos rígidos y otras estructuras, con el fin de contribuir al avance hacia una construcción más sostenible y eficiente.



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO



FACULTAD
DE INGENIERÍA



DIPFI
POSGRADO
INGENIERÍA

La relevancia social de esta investigación radica en su potencial para reducir los desechos plásticos, un problema ambiental de gran magnitud, mientras que la importancia científica reside en aportar nuevos conocimientos sobre el uso de materiales reciclados en la industria de la construcción, específicamente en el diseño de concretos con mejores propiedades mecánicas y más amigables con el medio ambiente. Esta tesis, por lo tanto, no solo pretende avanzar en la comprensión de las posibilidades de reciclaje del PET, sino también en su aplicación práctica en el campo de la ingeniería civil.

1.1 Antecedentes

De manera general el uso de PET en mezclas con concreto sin ningún uso en particular tenemos que Acebedo y Posada (2019) realizaron pruebas en porcentajes de 0%, 5%, 10%, 15% y 20% de sustitución de agregado fino 'arena' en mezclas de concreto de 28 Mpa intentando conservar la misma granulometría de la arena retirada, de la misma manera Aquino (2019) comparó el concreto convencional con la resistencia a compresión y durabilidad que obtenía la misma mezcla con el reemplazo de agregado grueso por 1%, 2%, 5% y 10% de PET además, Khajuria y Sharma (2019) llevaron a cabo un estudio en la India del uso de plástico en mezclas de concreto sustituyendo tanto el agregado grueso como el agregado fino en porcentajes de 0%, 2.5%, 5%, 7.5% y 10%. Es importante mencionar que a todas estas mezclas se le hicieron pruebas normadas de laboratorio y se pueden mencionar las de Lugo y Torres (2019) que realizaron pruebas en cilindros con incorporación de PET en porcentajes de 0.088%, 0.176% y 0.264% y en cantidades de 96kg, 188kg y 282 kg por cada m³ de mezcla. También se experimentó con estas mezclas el uso de aditivos para mejorar la fluidez de las mismas como en los estudios de Mendoza *et al.* (2011) donde analizaron la influencia del uso de fibras de polipropileno en las propiedades innatas del concreto en sus estados plástico y endurecido en porcentajes de 0.11% (1 kg/m³), 0.32% (3 kg/m³) y 0.54% (5 kg/m³) utilizando un superfluidificante (ASTM C494, Tipo F) cuando fue necesario para mantener el revenimiento en los límites establecidos, en este apartado también tenemos el uso de pruebas más específicas y poco comunes como son los estudios



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO



FACULTAD
DE INGENIERÍA



DIPFI
POSGRADO
INGENIERÍA

de Martínez-Barrera y Gencel (2015) llevando a cabo un estudio del uso de materiales de desperdicio limpiados y modificados usando radiación gamma y su uso en mezclas de concreto con porcentajes de uso de PET entre 1.0% y 5.0%.

No solo tenemos el análisis de mezclas de concreto con PET sino que también tenemos otros materiales como en los estudios de Cobos-Sáenz y Wladimir (2021) que compararon el comportamiento mecánico del concreto con entre 0.5% y 1% de fibra de PET reciclado así como adición de entre 0.5% y 1% de fibra de acero.

En cuanto al uso de PET en la construcción es importante mencionar que ya es existente y que algunos de los trabajos más recientes en el ámbito de uso para casa habitación son los de Caballero y Flórez (2016) elaborando bloques de concreto con sustitución de agregado fino en porcentajes de 12.5%, 25% y 37.5% de PET reutilizado y molido, de mismo modo Gonzales (2016) estudió en Perú las propiedades físicas y mecánicas de concreto con PET para uso en ladrillos con porcentaje de adición de 5%, 10% y 15% siguiendo esta tendencia tenemos que Aguilera y Diestra (2017) también estudiaron la influencia del PET en escamas en porcentajes de 0%, 0.5%, 1.0% y 1.5% en el concreto $f'c=210$ kg/cm² para uso en prefabricados como lo son los adoquines estudiados por Santiago *et al.* (2015) desarrollando un adoquín puramente de PET con una masa de 728 gramos además determinando la densidad del PET entre 1.33 a 1.38 g/cm³ y pudiendo soportar 20,000 N de carga sin deformaciones externas. Por otra parte, se tiene el uso específico en muros en el trabajo de Carrillo y Alcocer (2012) revisando los criterios de sostenibilidad en muros de concreto para viviendas sismorresistentes y describieron que una de las fibras más utilizadas como refuerzo son entre otras, el plástico aunque son poco elásticos, se tiene el análisis e influencia del cambio de forma en las fibras (o tiras) de PET en el concreto siendo Silva y Ochoa (2019) integrando PET reciclado trabajando a flexión en elementos constructivos de concreto por medio de entre 24 y 30 tiras uno de los trabajos el respecto. Además en el uso en la construcción se observa también el uso de aditivos como con Reyes (2018) que realizó una mezcla de $f'c=210$ kg/cm² con adición de 0.5%, 1% y 1.5% de polietileno de tereftalato para



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO



FACULTAD
DE INGENIERÍA



DIPFI
POSGRADO
INGENIERÍA

uso en losas de viviendas, adicionalmente también agregó aditivo plastificante Visco Crete 1110.

En el estudio de García y Vigo (2019) se tiene otra variante de análisis que son los concretos armados en los que el uso de plástico reciclado en mezclas para elaboración de concreto armado se comprobó con incorporación de 0% (mezcla de control), 5%, 10% y 15% y se analizó su tracción, compresión, absorción y succión así también se tiene la investigación de Aktham *et.al.* (2022) donde se evaluó el desempeño de concretos verdes de alto desempeño con adición de fibras PET, micro sílica y ceniza de combustible de aceite de palma ultrafina, obteniendo un aumento en la resistencia a la compresibilidad, en la curva esfuerzo-deformación, a la resistencia a la tracción y al comportamiento ante flexión.

Para finalizar estos antecedentes de manera más específica se tiene que en cuanto al uso de la mezcla PET-Concreto para pavimentos rígidos Santos (2006) estudió la contribución de fibras polipropileno de plásticos reciclados en el agrietamiento y la resistencia de las mezclas de concreto para pavimentos portuarios de Veracruz en porcentaje de adición de fibra de polipropileno del 0%, 0.25%, 0.50% y 0.75 %. Esquivel y Ticliahuanca (2019) analizaron la resistencia y agrietamiento por contracción en mezclas de concreto para uso en pavimentos rígidos incorporados con fibras dispersas de PET en dosificación de 0.03%, 0.05% y 0.07%. López (2019) presentó un estudio de cómo se mejoran las propiedades mecánicas del concreto hidráulico con homopolímeros reciclados, todo esto para ser usado como pavimento rígido, en este estudio se reemplazó un 3%, 6%, 9%, 12% y 20% del total del peso del cemento por polímero y Miranda (2020) utilizó una geomalla de PET como una alternativa de refuerzo estructural en pavimentos rígidos donde se observó un incremento en las propiedades de las carreteras de entre 15% y 18% y finalmente se tiene el trabajo de Mendoza (2021) quien utilizó poliestireno expandido y puzolanas naturales para evaluar la variación del módulo de ruptura de un pavimento rígido con agregado de 10% de zeolita y gránulos de poliestireno expandido tratados logrando hasta 16% la resistencia a la compresión aunque reduciendo la flexión en un 11% mientras que Panara *et. al.* (2022) utilizó tiras de PET en un



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO



FACULTAD
DE INGENIERÍA



DIPFI
POSGRADO
INGENIERÍA

porcentaje de 0.23% del volumen obteniendo un aumento de la compresión del concreto de un 13.4%, además todo lo anterior, investigaciones recientes como la de Rutuja y Vasudha (2023) menciona que el uso de fibras plásticas recicladas aumenta la fluidez y resistencia de las mezclas de concretos utilizando así también materiales de desperdicio y abaratando costos reportando Revathi *et. al.* (2023) que la incorporación de 0.3% de fibras de PET con relación al peso del cemento junto con un reemplazo del 10% de micro sílica es la proporción que mejores resultados aporta a los especímenes teniendo hasta un 12% más de resistencia a la compresión y una resistencia a la flexión 99% más alta ambas en comparación a una mezcla convencional, es importante mencionar que la forma en la que se utiliza el PET en las mezclas puede afectar el desempeño del mismo como lo describen Mohammed y Karim (2023) en su estudio describen que fibras más largas de PET tienden a prolongar el tiempo de fraguado de una mezcla con un radio de 122% a comparación de fibras más cortas.

1.2 Justificación

Rahmani et al. (2013) sostienen que el uso de partículas de botellas de PET reusadas como agregados en mezclas de concreto es factible, obteniendo una mejora en las propiedades físicas y mecánicas de la mezcla, además de disminuir la disposición de las botellas de PET en el medio ambiente, en este sentido Gravina et al. (2021) establecen que el uso de plástico reemplazando el agregado fino es una técnica prometedora para conservar recursos naturales siendo recomendado por Alesmar et al. (2008) que para el diseño de una mezcla óptima no se sustituya la arena (agregado fino) puesto que se producen discontinuidades dentro del mismo.

Además de todo lo anterior, en cuanto a pruebas en laboratorio tenemos que Foti (2010) obtuvo resultados favorables en la ductilidad de las mezclas de concreto reforzadas con fibras de PET y recomendó profundizar en el análisis de esta propiedad como investigación futura, sugiriendo utilizar diferentes radios de fibras-concretos para posteriores investigaciones, a su vez Rahmani et al. (2013) recomiendan analizar las propiedades de compresión y tensión dado que obtuvieron en sus estudios incremento en una y descenso en la otra,



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO



FACULTAD
DE INGENIERÍA



DIPFI
POSGRADO
INGENIERÍA

respectivamente. Así pues, se destaca la importancia de analizar estas dos propiedades mecánicas, ya que ambas propiedades son de importancia en el diseño de mezclas como lo indican Cárdenas y Lozano (2016), debido a que un pavimento de concreto sufre deformaciones por las cargas del tránsito que inducen esfuerzos de compresión y tensión.

Por lo expuesto se diseñará una mezcla que incorpore un porcentaje de 1%, 5% y 7% de fibras plásticas como sustitución de agregados tanto finos como gruesos, que mejore su comportamiento a compresión y tensión, obteniendo también un aprovechamiento del PET posterior a su vida útil y una manera de conservar recursos naturales.

1.3 Descripción del problema

La palabra plástico viene del latín *plasticus* que lo define como “moldeable”, la real academia española define a la palabra plástico como “dicho de ciertos materiales sintéticos: Que pueden moldearse fácilmente y están compuestos principalmente por polímeros, como la celulosa”, los plásticos que ocupamos de manera cotidiana son conocidos como plásticos sintéticos porque son derivados de alteración de la estructura molecular de materiales a base de carbono.

El volumen de materiales reciclados en México es reducido, en 2012 alcanzó alrededor del 9.63% del volumen de los residuos generados (INECC, 2012) en años posteriores no se analiza este punto solo en lugares de recolección y la cantidad que reciben mas no la que reciclan. México genera aproximadamente 102,895 toneladas de residuos al día, lo que también se traduce en un aproximado de más de 40 millones de toneladas al año del cual, solo el 84% son recolectados y únicamente entre el 9% y 10% es reciclado y es aún más relevante saber que en realidad hasta cerca del 85% de los residuos son susceptibles de ser reciclados o reutilizados (INAES, 2020). Tan solo el 15% del plástico fabricado mundialmente es recolectado para reciclaje y solo 9% es realmente reciclado (OCDE, 2022).

México es el primer consumidor a nivel global de bebidas azucaradas *per cápita* con un consumo de 163 L por persona al año (Braverma-Bronstein *et al.*, 2019), tomando en cuenta



que en 2020 la población de México fue de 126,014,024 habitantes (INEGI, 2020) esto nos daría un total de 20,540,285,912 L de refresco total consumidos al año en México si trasformamos estos litros en diferentes tamaños de botellas obtenemos el aproximado de botellas PET anuales en México como se ve en la Tabla 1.

Tabla 1. Cantidad de botellas PET desechadas al año en México (bebidas azucaradas)

Capacidad en litros más común en refrescos embotellados de PET (Coca-Cola company)	Botellas anuales en México (botellas/año)
500 ml	41,080,571,824
2 L	10,270,142,956

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del INEGI (2020) y Braverma-Bronstein *et al.* (2020).

A la par México es también el consumidor mundial número uno de agua embotellada *per cápita* (Pacheco-Vega, 2017) con un consumo de 170.7 litros en el 2011 (Pacheco-Vega, 2015) dando un total de 21,422,384,080 L, esto lo podemos dimensionar en la Tabla 2 ya convertido a cantidad de PET.

Tabla 2: Cantidad de botellas PET desechadas al año en México (agua embotellada)

Capacidad en litros más común en agua embotellada de PET (Bonafont)	Botellas anuales en México (botellas/año)
500 ml	42,844,768,160
20 L	1,071,119,204

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de INEGI (2020) y Pacheco-Vega (2015, 2017).

La expectativa de tiempo en el mercado del PET es de unos cuantos meses en los estantes y de unas cuantas horas en manos del consumidor, esto supone un problema para el alcantarillado ya que puede causar obstrucciones, encharcamientos en las vías terrestres y una percepción negativa por parte del usuario.

Como menciona Vilakazi *et al.* (2022) usar residuos en el concreto puede ser beneficioso tanto en la industria de la construcción mejorando las características de durabilidad y



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO



FACULTAD
DE INGENIERÍA



DIPFI
POSGRADO
INGENIERÍA

resistencia del concreto así como en la industria del manejo de residuos para lograr una estrategia de cero residuos con la aproximación de una economía circular.

Por su parte CONACYT menciona en los PRONACES la importancia de investigaciones que impacten en ámbitos específicos aportando a la sociedad, entre los que podemos encontrar uno que tiene relación directa con el siguiente proyecto de investigación siendo este:

- **Sistemas Socio ecológicos y Sustentabilidad:** Citado del sitio Web de CONACYT (2022): “tiene como objetivo impulsar la coproducción de conocimiento a nivel técnico-científico [...] para llevar a cabo acciones de conservación, restauración, uso y aprovechamiento de los ecosistemas, de los recursos naturales y de la biodiversidad desde una perspectiva de sustentabilidad y de justicia social. [...] A través de proyectos [...] de incidencia en la búsqueda de un desarrollo sustentable [...]”

Por lo que una investigación con posterior uso en carreteras con mejoras en sus propiedades por medio del uso de desechos estaría totalmente acorde a este PRONACE. Por otra parte de manera indirecta podría estar relacionado con el PRONACE de Vivienda dado que su uso posterior podría ser adaptado para un aprovechamiento de viviendas resistentes con menores precios de construcción.

1.4 Hipótesis, objetivo y objetivos específicos

Hipótesis:

La sustitución parcial de agregado por “PET” mejora las propiedades de resistencia a compresión y tensión de la mezcla de pavimento rígido hasta en un 10% a los 28 días de edad respecto a un concreto convencional.

Objetivo:

Analizar la resistencia a compresión y tensión del concreto $f^c=210$ kg/cm² con sustitución de 1%, 5% y 7% de agregados con PET para determinar aumento de su resistencia en comparación con una mezcla convencional.



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO



FACULTAD
DE INGENIERÍA



DIPFI
POSGRADO
INGENIERÍA

Objetivos específicos:

- Determinar las proporciones ideales de PET-Concreto con las que la mezcla se homogenice de la mejor manera.
- Determinar las condiciones de molienda de PET ideales para una granulometría variada.

2. MARCO TEÓRICO

Este capítulo abarca conceptos con relación a los pavimentos rígidos, todo lo involucrado al reciclaje de PET y también de materiales pétreos.

2.1 Terraplén

Los terraplenes son estructuras formadas mediante la acumulación y compactación de materiales obtenidos de cortes en el terreno natural o extraídos de bancos de materiales, con el propósito de alcanzar el nivel de subrasante especificado en el proyecto o por la Secretaría correspondiente. Estas estructuras no solo permiten nivelar y adaptar el terreno, sino también ampliar la corona del camino, servir de base para cimentaciones de diversas estructuras, crear bermas y bordos de contención, y dar forma a los taludes para mejorar la estabilidad y seguridad de la obra.

Los materiales utilizados en la construcción del cuerpo del terraplén, así como en la ampliación de la corona y el tendido de taludes de terraplenes existentes, pueden variar en su compactabilidad, especialmente cuando son extraídos de cortes en el terreno, donde pueden ser compactables o no compactables. Sin embargo, cuando estos materiales provienen de bancos de materiales, o se destinan a la construcción de capas subyacentes y subrasantes, deberán ser siempre compactables para garantizar la estabilidad y resistencia de la estructura final.

El nivel óptimo de compactación requerido para un terraplén dependerá de manera fundamental de las especificaciones técnicas establecidas en el proyecto de construcción, así como de las propiedades físicas y mecánicas del material seleccionado para la construcción.



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO



FACULTAD
DE INGENIERÍA



DIPFI
POSGRADO
INGENIERÍA

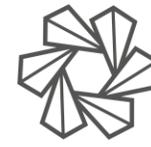
Dichas especificaciones responden a estudios de ingeniería y a las normativas establecidas por las autoridades competentes, como la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), en las que se definen los estándares de densidad relativa que deben alcanzarse para asegurar la estabilidad, durabilidad y funcionalidad de la estructura a largo plazo.

Es preciso considerar que cada tipo de material tiene una capacidad de compactación particular y, por lo tanto, exige un proceso de compactación específico. Los materiales granulares, por ejemplo, suelen compactarse a un nivel óptimo mediante métodos distintos a los que se utilizan para materiales cohesivos, dado que presentan diferentes características de densidad y resistencia al aplicar cargas. Además, las condiciones de humedad también influyen significativamente en el proceso, ya que el contenido de humedad debe ser el adecuado para facilitar el acomodo de las partículas y maximizar la densidad obtenida en cada capa de relleno.

2.2. Subrasante

Los materiales empleados en la conformación de la capa de subrasante suelen ser suelos naturales, cuidadosamente seleccionados o cribados, y provienen ya sea de los cortes realizados en el terreno o de bancos de materiales. Estos materiales se colocan directamente sobre la superficie resultante de los cortes, sobre la capa subyacente o sobre el cuerpo del terraplén en los casos en que no se haya construido esta última. La capa de subrasante se construye con el propósito de proporcionar una base adecuada para el desplante de un pavimento, asegurando así una superficie de soporte estable y resistente. Además, la selección y procesamiento de los materiales de esta capa son esenciales para garantizar la durabilidad y el desempeño estructural del pavimento, ya que la subrasante debe soportar tanto el peso del pavimento como las cargas dinámicas que generará el tránsito.

Los materiales seleccionados para la formación de la capa de subrasante deberán cumplir con ciertas especificaciones según sus características y la intensidad de tránsito proyectada, medida en el número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas acumulados a lo largo de la vida útil del pavimento. Estos requisitos son obligatorios, a menos que exista un estudio técnico



aprobado por la Secretaría que respalde el uso de materiales con propiedades diferentes. Es importante destacar que no se deben emplear materiales altamente orgánicos, como la turba (Pt), en esta capa.

Cuando la intensidad de tránsito esperada sea de un millón de ejes equivalentes o menos, el material deberá cumplir con los requisitos granulométricos y de calidad especificados en la Tabla 3 y presentar un espesor mínimo de 20 centímetros. En el caso de que la intensidad del tránsito estimada esté entre uno y diez millones de ejes equivalentes, el material de la capa subrasante deberá cumplir con los estándares de calidad definidos en la Tabla 3 y deberá contar con un espesor mínimo de 30 centímetros.

Tabla 3: Requisitos de calidad de materiales para capa subrasante

Característica	Valor
Tamaño máximo; mm	76
Límite líquido; %, máximo	40
Índice plástico; %, máximo	12
Valor Soporte de California (CBR), %, mínimo	20
Expansión máxima; %	2
Grado de compactación; %	100 \pm 2

Recuperado de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT) n-cmt-1-03-21, 2021

2.3 Subbase

Se trata de materiales granulares que se colocan sobre la subrasante con el objetivo de crear una capa de soporte para la base de pavimentos asfálticos. Estos materiales, dependiendo de su proceso de preparación, pueden clasificarse en las siguientes categorías:

1. Materiales naturales

Consisten en arenas, gravas y limos, así como rocas muy desgastadas y fragmentadas que, al ser extraídas, se presentan sueltas o pueden disgregarse con maquinaria. Tras su extracción y, en su caso, disgregación, no deben contener más del 5% de partículas mayores de 3", las cuales deben retirarse manualmente, ni superar el 25% de partículas que pasen por la malla N°200.



2. Materiales cribados

Son también arenas, gravas, limos y rocas fragmentadas que, al extraerse, quedan sueltos o pueden separarse mediante maquinaria. Si contienen entre un 5% y un 25% de partículas mayores de 3" y no superan el 25% de partículas que pasen por la malla N°200, se requiere un proceso de cribado mecánico con el equipo adecuado para lograr la granulometría deseada.

3. Materiales parcialmente triturados

Estos materiales, como mezclas de gravas, arenas y limos presentan poca o nula cohesión, y al extraerse se encuentran sueltos o fácilmente disgregables. Contienen entre un 25% y un 75% de partículas mayores de 3" y necesitan un tratamiento de trituración parcial y cribado para lograr la granulometría adecuada.

4. Materiales totalmente triturados

Se trata de materiales obtenidos de bancos o seleccionados que requieren un tratamiento completo de trituración y cribado, utilizando el equipo adecuado, para cumplir con los requisitos granulométricos establecidos.

5. Materiales mezclados

Estos materiales se obtienen al mezclar dos o más de los materiales descritos en las categorías 1 a la 3 en proporciones que aseguren el cumplimiento de los estándares de calidad especificados en la Norma.

6. Selección del tratamiento

Si la granulometría del material extraído de un banco, luego de someterse a tratamiento mecánico, no cumple con los requisitos estipulados en la tabla 4 y la tabla 5, podrá mezclarse con materiales provenientes de otros bancos en una proporción adecuada para alcanzar las especificaciones exigidas. En ningún caso se permitirá la adición de materiales finos que aumenten la plasticidad de la mezcla. El Contratista será responsable de implementar los



procedimientos de mezcla necesarios para asegurar la homogeneidad del material, evitando tanto la segregación como la degradación de este.

Tabla 4: Requisitos de granulometría de los materiales para subbases de pavimentos asfálticos.

Malla		Porcentaje que pasa	
Abertura mm	Designación	$\Sigma L \leq 10^6 *$	$\Sigma L > 10^6 *$
50	2"	100	100
37.5	1 1/2"	72-100	72-100
25	1"	58-100	58-100
19	3/4"	52-100	52-100
9.5	3/8"	40-100	40-100
4.75	N°4	30-100	30-80
2	N°10	21-100	21-60
0.85	N°20	13-92	13-45
0.0425	N°40	8-75	8-33
0.25	N°60	5-60	5-26
0.15	N°100	3-45	3-20
0.075	N°200	0-25	0-15

Fuente: Recuperado de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT) n-cmt-4-02-001/11, 2011 * ΣL = Número de ejes equivalentes acumulados, de 8,2 t, esperado durante la vida útil del pavimento.

Tabla 5: Requisitos de calidad de los materiales para subbases de pavimentos asfálticos.

Característica	Valor %	
	$\Sigma L \leq 10^6 *$	$\Sigma L > 10^6 *$
Límite líquido, máximo	30	25
Índice plástico, máximo	10	6
Valor Soporte de California (CBR), mínimo	50	60
Equivalente de arena, mínimo	30	40
Desgaste de los Ángeles, máximo	50	40
Grado de compactación, mínimo	100	100

Fuente: Recuperado de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT) n-cmt-4-02-001/11, 2011 * ΣL = Número de ejes equivalentes acumulados, de 8,2 t, esperado durante la vida útil del pavimento.



2.4. Base hidráulica

Se trata de materiales granulares que generalmente se colocan sobre la subbase o la subrasante con el propósito de formar una capa de soporte para una carpeta asfáltica, una capa de rodadura asfáltica o una carpeta de concreto hidráulico. Dependiendo del tratamiento que hayan recibido, estos materiales se clasifican en las siguientes categorías:

1. Materiales cribados

Son arenas, gravas, limos y rocas alteradas o fragmentadas que, al ser extraídas, quedan sueltas o pueden disgregarse con el uso de maquinaria. Para que estos materiales sean utilizables, deben someterse a un tratamiento mecánico de cribado utilizando el equipo adecuado, con el fin de eliminar las partículas mayores que el tamaño máximo permitido y cumplir con la composición granulométrica requerida.

2. Materiales parcialmente triturados

Son materiales poco o nada cohesivos, como mezclas de gravas, arenas y limos, que al ser extraídos permanecen sueltos o pueden disgregarse. Para hacerlos utilizables, requieren un tratamiento de trituración parcial y cribado con el equipo adecuado, que permita aprovechar las partículas mayores que el tamaño máximo estipulado y cumplir con la composición granulométrica.

3. Materiales totalmente triturados

Son aquellos materiales extraídos de un banco o recolectados, que necesitan un tratamiento mecánico completo de trituración y cribado con el equipo adecuado para cumplir con la composición granulométrica establecida.

4. Materiales mezclados

Se obtienen al mezclar dos o más de los materiales descritos en las categorías 1 a la 3, en las proporciones necesarias para cumplir con los requisitos de calidad especificados.



5. Elección del tratamiento

El material destinado para la base hidráulica deberá ser 100% producto de la trituración de roca sana cuando se espere un tránsito acumulado superior a diez millones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas durante la vida útil del pavimento. Si el tránsito estimado es de entre uno y diez millones de ejes equivalentes, el material deberá contener al menos el 75% de partículas provenientes de la trituración de roca sana. En casos donde el tránsito esperado sea inferior a un millón de ejes equivalentes, el material deberá contar con al menos el 50% de partículas provenientes de la trituración de roca sana.

En los casos en que se coloque una carpeta de concreto hidráulico inmediatamente después de la construcción de la base, el material utilizado deberá cumplir con las características granulométricas especificadas en la tabla 6, además de los requisitos de calidad detallados en la tabla 7.

Tabla 6: Requisitos de granulometría de los materiales para bases de pavimentos con carpetas de concreto hidráulico.

Malla		Porcentaje que pasa
Abertura mm	Designación	$\Sigma L \leq 10^6$ *
37.5	1 ½"	100
25	1"	70-100
19	¾"	60-100
9.5	3/8"	40-100
4.75	N°4	30-80
2	N°10	21-60
0.85	N°20	13-44
0.0425	N°40	8-31
0.25	N°60	5-23
0.15	N°100	3-17
0.075	N°200	0-10

Fuente: Recuperado de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT) n-cmt-4-02-002/16, 2016



Tabla 7: Requisitos de calidad de los materiales para bases de pavimentos con carpetas de concreto hidráulico.

Característica	Valor %
Límite líquido, máximo	25
Índice plástico, máximo	6
Equivalente de arena, mínimo	40
Valor Soporte de California (CBR), mínimo	80
Desgaste de los Ángeles, máximo	35
Partículas alargadas y lajeadas, máximo	40
Grado de compactación, mínimo	100

Fuente: Recuperado de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT) n-cmt-4-02-002/16, 2016

2.5 Pavimento rígido

De acuerdo con el Ministerio de transportes y comunicaciones de Perú (2014) son llamados así por la naturaleza de la losa de concreto que la constituye, son rígidos, la losa absorbe casi todos los esfuerzos producidos por repeticiones de cargas de tránsito, teniendo las capas inferiores menor intensidad de esfuerzos y a la subrasante y existe tres tipos de pavimentos de concreto:

- Pavimento de concreto simple con juntas
- Pavimento de concreto reforzado con juntas
- Pavimentos de concreto continuamente reforzados.

Según lo estipulado por el método AASHTO 93, se estima que para un pavimento rígido nuevo se empieza a dar servicio a nivel alto, con el paso del tiempo y las repeticiones de carga de tránsito el servicio disminuye.

Parámetros que intervienen:

I. Periodo de diseño

Según lo estipulado por el Ministerio de transportes y comunicaciones de Perú (2014) el periodo de diseño para pavimento rígido será mínimo de 20 años, ajustable según lo requiera el proyecto y lo requerido por la entidad.



II. Transito (*ESALs*)

Una característica del método AASHTO 93 es la simplificación en ejes equivalentes; transforma las cargas de ejes de todo tipo de vehículo en ejes equivalentes de 8.2 toneladas llamados *ESALs* (*equivalent single axle load*).

En cuanto al tráfico se definen tres categorías de acuerdo con el Ministerio de transportes y comunicaciones de Perú (2014):

- Camino con bajo volumen de tránsito menor a 1,000,001.
- Camino con tránsito entre 1,000,001 hasta 30,000,000 ejes equivalentes.
- Camino con tránsito mayor a 30,000,000 de ejes equivalentes diseñada por el ingeniero proyectista analizando alternativas y justificando la solución adoptada.

Drenaje (Cd)

De acuerdo con el Ministerio de transportes y comunicaciones de Perú (2013), la humedad o la presencia de agua acarrea los siguientes problemas:

- Erosión del suelo por migración de partículas
- Ablandamiento de la subrasante por saturación prolongada (acrecentado en congelamiento)
- Degradación de la carpeta por humedad
- Deformación
- Fisuramiento creciente por pérdida de capacidad estructural

El coeficiente de drenaje varía entre 0.70 y 1.25 (mientras más alto mejor drenaje) y se puede clasificar de acuerdo con lo estipulado en la tabla 8.

Tabla 8: Condiciones de drenaje.

Calidad de drenaje	50% de saturación en:	85% de saturación en:
Excelente	2 horas	2 horas
Bueno	1 día	2 a 5 horas
Regular	1 semana	5 a 10 horas
Pobre	1 mes	Más de 10 horas
Muy pobre	El agua no drena	Mucho más de 10 horas

Fuente: Recuperada del Ministerio de transportes y comunicaciones de Perú (2013).



2.6 Reciclaje de agregados pétreos

En una de las investigaciones más antiguas que se reportaran en el siguiente trabajo se tiene que Fergus (1981) experimento con un agregado de concreto reciclado que había soportado 300 ciclos en una cámara de congelamiento y deshielo sorprendentemente los resultados fueron que los agregados reciclados mantenían sus propiedades siendo durables y de buena calidad esto quiere decir que estructuras existentes de concreto además de proveer una fuente de agregados reciclados en el presente podrían ser ocupadas también en el futuro sin afectar sus características y calidad.

Las ventajas de uso de concreto reciclado son: el uso de un material que de otra manera sería clasificado como desperdicio, se reduce el uso de combustible (tanto en transporte como en explotación), la reducción de los kilómetros de acarreo y reducción del uso de recursos no renovables (bancos de materiales naturales).

Los GRAC (por sus siglas en inglés que significan “Concretos verdes de agregados reciclados”) cumplen con la idea de sustentabilidad enfocados en la protección medioambiental debido a que estos reducen las emisiones de CO₂ reduciendo a su vez el uso, y su explotación, de materiales naturales y con ello reduciendo el consumo energético a pesar de todo lo anterior las propiedades de los agregados reciclados es variable y eso implica un decrecimiento de las características de las mezclas que los contienen por lo que sería importante su uso en combinación con agregados naturales y no como reemplazo total.

En investigaciones más recientes como es la de Jadon (2023) se describe que la selección del agregado pétreo no debería depender solo de su resistencia, dimensiones y propiedades mecánicas, sino de su durabilidad es por esto que se evaluarán las características de desgaste de los pétreos reciclados y de los pétreos naturales. Este párrafo toma relevancia debido a que la normativa mexicana, e incluso la normativa internacional, toma en cuenta solo los datos obtenidos de las pruebas por reglamentación para tomar la decisión de ser aceptado o rechazado para su uso en la construcción de carreteras, a pesar de que los números investigaciones constantemente remarcan la necesidad de ser evaluados por desempeño



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO



FACULTAD
DE INGENIERÍA



DIPFI
POSGRADO
INGENIERÍA

donde estos, los agregados reciclados, tienden a tener mejores valores que los agregados naturales.

La siguiente investigación y experimentación toma que, las características de los materiales reciclados son variables de acuerdo a los concretos recibidos en cada lugar y este banco de reciclados, al estar ubicado en el estado de queretaro debe ser evaluado, por medio de la normativa mexicana vigente a fin de cumplir con la misma y poder ser utilizado en la construcción de obras locales teniendo alternativas en la construcción de carreteras pudiendo ser ocupado si bien no, en una capa estructural, como una capa inferior como pudiese ser las terracerías de una carretera.

2.7 Reciclaje de PET

Trabajos con mezclas PET-Cemento

En las ciudades existe un problema recurrente que afecta tanto visual como funcionalmente a las vías terrestres y es el aumento de los desechos PET, dado que su expectativa de tiempo en el mercado es de unos cuantos meses en los estantes y de unas cuantas horas en manos del consumidor pero una vez que este objetivo es cumplido el destino final del PET es incierto pudiendo terminar en basureros municipales en el caso más común en las ciudades o en el sistema de alcantarillado en uno de los peores, este último caso es de alto riesgo para la población ya que causa obstrucciones que, a mediano y largo plazo, ocasionan pérdidas económicas tanto para el estado como para el usuario ya que al haber obstrucción, en caso de precipitaciones las aguas pluviales no tienen un canal por el cual desfogar resultando en encharcamientos en las calles y avenidas costando tiempo al usuario al necesitar bajar la velocidad de circulación y en algunas ocasiones fallas mecánicas en los vehículos motorizados por la filtración de agua en el motor y para el estado esto tiene como consecuencia la necesidad de contratación de personal capacitado y equipo especializado



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO



FACULTAD
DE INGENIERÍA



DIPFI
POSGRADO
INGENIERÍA

para desatascar el sistema de drenaje así como un impacto negativo en la percepción del ciudadano al no satisfacerse su necesidad de transitar en un espacio rápido, seguro y cómodo, todo esto tendría un impacto económico positivo a nivel local e incluso nivel estatal de implementarse en todo el estado.

La incorporación de triturado de PET de manera controlada y sistemática a una mezcla de concreto plantea una solución ecológica al darle una utilidad posterior y funcional a estos residuos sólidos dado el futuro incierto de su disposición final, pudiendo tener incluso un impacto positivo en la mezcla al esperarse un incremento de la resistencia innata del concreto.

A partir de los siguientes 4 trabajos de investigación se forma un estado de conocimiento de los trabajos con mezclas PET-Cemento, estos siendo presentados en orden cronológico del más antiguo al más reciente empezando con Alesmar *et al.* (2008) quienes utilizaron PET donado por una compañía trituradora que lo exportaba a China como materia prima de textiles a base de Poliéster con un tamaño aproximado entre $\frac{1}{4}$ " a $\frac{1}{2}$ " sin granulometría de este para hacer mezclas PET-Cemento con el objetivo de determinar su potencial para ser utilizado como material de construcción. Elaboraron 21 probetas con las proporciones mostradas en tabla 9, se utilizaron dos tipos de probetas: cilíndricas y paralelepípedos. Para los ensayos realizados se ocuparon probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura (Normativa Venezolana) y de 5 cm de diámetro por 10 cm de altura usadas para ensayos de compresión, probetas cilíndricas de 5 cm de diámetro por 10 cm de altura para ensayos de absorción y erosión y paralelepípedos de 20 cm de largo, 20 cm de ancho y 5 cm de alto para ensayos de impacto, todas ellas con su respectivo proceso de curado según normativa y obtuvieron como resultado la factibilidad del uso del PET como agregado en mezclas contribuyendo de manera directa a la disposición de final de plásticos e indirectamente a la disminución del impacto ambiental pudiendo ser estas mezclas utilizadas en obras civiles con cargas y durabilidad limitadas en cierto rango.



Tabla 9: Componentes de las Mezclas.

Material	Mortero con un 5% de PET reciclado.	Concreto con un 15% PET reciclado	Mezcla un convencional de mortero.	Mezcla convencional de concreto.	Mortero con un 10% de PET reciclado.
PET (Kg)	2.017	2.560	0.000	0.000	1.700
CEMENTO (Kg)	7.645	6.240	6.390	3.750	6.420
ARENA (Kg)	44.013	16.670	35.200	17.750	35.030
PIEDRA (Kg)	0.000	19.620	0.000	17.750	0.000
AGUA (L)	5.275	4.710	4.700	4.300	4.730

Recuperada de la tesis Diseños de mezcla de tereftalato de polietileno (PET) – cemento (2008).

Continuando con el siguiente trabajo tenemos que Foti (2010) experimentó con concreto reforzado con fibras de botellas de desecho cortadas en tiras de 3.2 cm de largo, 0.2 mm² de área y fibras circulares de entre 3 y 5 cm con un ancho variable de 0.5 cm aproximadamente, basada en la necesidad de una solución para el fenómeno de agrietamiento por asentamientos que afecta la vida útil de servicio de los concretos logrando un mejor resultado en concretos con presencia ya de agrietamiento debido a un efecto tipo costura evitando la propagación de las mismas, teniendo además mejoras en dureza, ductilidad (recomendado mayor análisis de esta propiedad), abrasión y fatiga. Las muestras que se hicieron fueron seis paralelepípedos de 10x10x40 centímetros en el primer set de pruebas, posteriormente se volvieron a ensayar veintidós muestras en total siendo ocho paralelepípedos de 10x10x40 y catorce cubos de



10x10x10 las dosificaciones de las fibras se encuentran en la tabla 10 posteriormente mostrada.

Tabla 10: Dosificación de mezclas.

Mezclas	Concreto Portland (Kg)	Agregados (Kg)	Fibras (Gr)	Agua (L)
Concreto ordinario	4	20	0	2.8
Concreto con fibras laminares	4	20	50	2.8
Concreto con fibras circulares	4	20	50	2.8

Recuperada de la tesis Análisis preliminar de concreto reforzado con fibras de botellas PET desechadas (2010).

Otro trabajo de investigación de interés es el de Rahmani *et al.* (2013) quienes desarrollaron mezclas de PET-Cemento con las proporciones mencionadas en la tabla 11 mezclando primero la grava con la mitad de la arena y finalizando con el PET triturado en partículas finas; se le aplicaron pruebas a la mezcla fresca para determinar características de trabajabilidad y su homogeneidad, después de esta prueba inicial dejaron curar los cilindros y a los 28 días se les aplicó pruebas de compresión, resistencia al cortante y de módulo de elasticidad, adicional a esto se hicieron y ensayaron vigas determinando así el esfuerzo a tensión que resistían y finalmente se ensayaron con una maquina eléctrica ultrasónica no destructiva en muestras cubicas de 10x10x10 cm para medir la porosidad interna, una vez terminados los ensayos se concluyó que un contenido del 5% de PET sería el contenido óptimo para obtener un aumento en la resistencia a la compresión entre el 8.86% y el 11.97% aunque un reemplazo del 10% de agregados finos por PET presenta las mismas propiedades mecánicas que una mezcla convencional además, debido a los poros dejados por las partículas del PET la muestra presenta buenas propiedades aislantes de sonido, todo esto se



investigó por la cantidad de material no biodegradable que se desecha y desaprovecha en el ambiente así como el constante crecimiento poblacional que acrecienta este problema.

Tabla 11: Proporciones de las mezclas de concreto.

Material	Contenido (Kg/m ³)							
	Agua/cemento=0.42				Agua/cemento = 0.54			
	0%	5%	10%	15%	0%	5%	10%	15%
	PET	PET	PET	PET	PET	PET	PET	PET
Cemento	488.10	488.10	488.10	488.10	379.60	379.60	379.60	379.60
Agua	209.90	209.90	209.90	209.90	210.20	210.20	210.20	210.20
Grava	976.10	976.10	976.10	976.10	976.10	976.10	976.10	976.10
Arena	654.90	622.00	589.40	556.60	745.90	708.60	671.30	634.00
PET	0	8.80	17.60	26.40	0	10.00	20.00	30.00

Recuperada y traducida de la tesis Sobre las propiedades mecánicas del concreto con residuos de partículas de PET (2013).

Por último uno de los trabajos más recientes en el ámbito PET-Cemento que encontramos es el de Gravina *et al.* (2021) quienes utilizaron botellas de leche de polietileno de alta densidad posconsumo trituradas en hojuelas con diámetros nominales entre 1 mm y 7 mm, se ensayaron catorce mezclas enlistando en la tabla 12 los ocho tipos de mezclas que pasaron los ensayos de acuerdo con la normativa vigente canadiense, el objetivo fue el de conservar recursos naturales y obtener mejoras en las propiedades del concreto así como llevar a un caso de estudio con aplicación real estas mezclas.

Sus resultados apuntan a la poca practicidad de usar plástico con gran área de superficie dado que aumenta la probabilidad de aparición de éstas teniendo como consecuencia un acabado muy rugoso, es recomendando el uso de menos del 25% de volumen de agregados plásticos en reemplazo de agregados naturales a fin de lograr las propiedades mecánicas deseadas manteniendo la sustentabilidad del concreto.

Tabla 12: Proporciones de polietileno de alta densidad en las mezclas.

Mezcla No.	Agregados 14 mm (kg/m ³)	Arena (kg/m ³)	Cemento (kg/m ³)	GGBFS (kg/m ³)	HDPE (kg/m ³)	Agua (kg/m ³)	Relación agua/cemento
1	1012.9	925.3	304.6	0.0	0.0	168.4	0.55
2	911.6	925.3	304.6	0.0	67.0	168.4	0.55
3	810.3	925.3	304.6	0.0	126.9	168.4	0.55
4	1012.9	925.3	274.2	30.5	126.9	168.4	0.55
5	1012.9	925.3	152.3	152.3	126.9	168.4	0.55
6	1012.9	925.3	301.6	33.5	126.9	185.2	0.55
7	1012.9	925.3	315.3	35.0	126.9	193.6	0.55
8	1012.9	925.3	329.0	36.6	126.9	202.0	0.55

Recuperada y traducida del artículo HDPE y PET como reemplazo de agregados en el concreto: evaluación del ciclo de vida, desarrollo del material y un caso de estudio (2021).

3. METODOLOGÍA

A continuación se describe toda la metodología a emplear para el desarrollo de un pavimento rígido adicionado con PET y agregados pétreos reciclados.

3.1 Diagrama de metodología, descripción de las fases y buenas prácticas de laboratorio

La metodología general del análisis propuesto en este trabajo se ilustra gráficamente en el figura 1 presentado a continuación:



Figura 1: Metodología general del proyecto.

Elaboración propia, imágenes de uso libre en Google.



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO



FACULTAD
DE INGENIERÍA



DIPFI
POSGRADO
INGENIERÍA

La siguiente metodología constará de tres fases, siendo la primera la fase de recolección de la materia prima necesaria así como la planeación de la dosificación, comportamiento de las mezclas y la selección de los moldes, la segunda fase abarcará de la elaboración final de los cilindros a ensayar, el tiempo que les tomará llegar a su resistencia máxima siguiendo las prácticas de curado de la normativa y finalmente el ensaye de estas. La última fase consta básicamente del análisis de todos los resultados obtenidos en las pruebas de tensión y compresión de los cilindros haciendo un análisis comparativo a la par con la mezcla convencional.

La FASE 1 constará de la obtención de materiales, se iniciará en centros de acopio de la ciudad de Querétaro, Querétaro, México o en industrias con desperdicio de plásticos como producto de residuos de sus procesos principales. Posterior a ellos las muestras recuperadas de PET se analizarán granulométricamente (de ser posible) así como se limpiarán para evitar que cualquier impureza contamine la mezcla con concreto que se elaborara posteriormente.

Se propondrán las dosificaciones de agua según las especificaciones del fabricante en el caso de Cemento Portland Compuesto CPC 30R marca Moctezuma serían 1 y ½ botes de 18 litros de agua, 3 y ½ botes de 18 litros de arena y 5 botes de 18 litros de grava de $\frac{3}{4}$ (estas proporciones pueden variar según lo arrojado en las pruebas por la calidad de los materiales en la región). A los agregados se les harán pruebas de granulometría y a la mezcla de concreto se le hará prueba de fluidez y los moldes serán de 15 cm de altura y 7.5 cm de diámetro según la relación altura-diámetro de 1 a 2 estipulado en la norma M-MMP-2-02-055/06 hasta aquí corresponde a la fase 1 de obtención de materiales, preparación y análisis de estos.

En la FASE 2 se llevará a cabo la elaboración de los cilindros con distintas proporciones de PET en los moldes elaborando también una mezcla convencional que servirá de control comparativo con las que contienen PET, estas se curarán a 14 y 28 días siendo ensayadas en los mismos días respectivamente.

Para las pruebas de compresión simple se llevará a cabo en una prensa hidráulica con las características de acuerdo con la norma M-MMP-2-02-058/04 del IMT así mismo para las



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO



FACULTAD
DE INGENIERÍA



DIPFI
POSGRADO
INGENIERÍA

pruebas a tensión se llevarán a cabo en una prensa hidráulica con las características de acuerdo con la norma NMX-C-169-0NNCCE.

La última fase, la FASE 3 se llevará a cabo una vez ensayados los cilindros a los diferentes días de curado se compararán los resultados de la mezcla convencional contra la mezcla en PET en diferentes porcentajes y se grafican los resultados en graficas esfuerzo-deformación con el objetivo de hacer más fácil la interpretación de los resultados.

Serán aplicadas también cualquier otra normativa mexicana o internacional que se considere necesaria.

Buenas prácticas de laboratorio:

Es importante resaltar que debido a que se utilizarán equipos mecánicos para el ensaye de las mezclas se tendrá especial cuidado en la integridad física de cualquier persona involucrada en su manipulación y se seguirán los pasos estipulados en el laboratorio para la correcta disposición final de cualquier residuo que pudiera afectar a los seres vivos y/o al ambiente, se enlistan algunas recomendaciones a seguir durante el uso de las instalaciones del laboratorio:

- Uso de prendas de protección como: bata, zapato cerrado (no tenis), gafas de protección, cubrebocas en caso de trabajar con materiales tóxicos o en presencia de polvo y/o gases en el ambiente de trabajo, tapones de oído y cualquier otro que observe necesario durante la ejecución de las pruebas.
- Consultar con técnicos capacitados el uso correcto de los equipos de laboratorio a fin de minimizar accidentes y/o avería de los equipos.
- Cerciorarse del estado de los equipos y su calibración.
- Limpieza de equipos y área de trabajo a su uso.
- Manejo responsable de los residuos de las pruebas según las instrucciones del laboratorio.
- Hacer buen uso del agua y no contaminarla con residuos.



3.2 Fase I

3.2.1 Selección de bancos de materiales

La participación de los agregados en la composición del concreto desempeña un papel esencial al modificar tanto sus características físicas como mecánicas. En consecuencia, la elección cuidadosa del banco de materiales pétreos se convierte en un factor determinante que incide de manera considerable en el rendimiento global del concreto.

En el marco de este proyecto, los agregados naturales fueron extraídos de la cantera perteneciente al corporativo Abraham González, ubicada en la pintoresca cañada del municipio del Marqués, Querétaro. Dicha fuente ha ganado reconocimiento por suministrar materiales pétreos de alta calidad que cumplen con estrictas normativas, consolidándose como proveedora



Figura 2: Ubicación "corporativo Abraham González" obra Blvd de la Nación

Imagen de Google Street View

de estos insumos para diversas obras civiles a lo largo de varios años en el estado, específicamente el material suministrado provenía de una de sus obras por lo que solo fue necesario acudir hasta el Boulevard de la Nación, su ubicación satelital puede ser apreciada en la figura 2.

La elección estratégica del banco "Reurba" como proveedor de agregados pétreos reciclados se basó en criterios ambientales y de sostenibilidad. Esta empresa ostenta la distinción de ser la única certificada en el registro de prestadores de servicios ambientales en materia de impacto ambiental, especializada específicamente en la gestión de residuos de construcción en el estado de Querétaro. Además de sus credenciales medioambientales, la decisión



Figura 3: Ubicación "Reurba"

Imagen de Google Street View

también consideró la accesibilidad de este banco y la disposición del propietario para

asegurar el suministro eficiente del material necesario para el proyecto, en la figura 3 se aprecia la localización del banco mientras que en la figura 4 se muestra una imagen del banco en sitio.



Figura 4: Vista en sitio del banco

Fuente propia

3.2.2. Cuarteo del material

Antes de llevar a cabo el cuarteo, se ejecutó un procedimiento de secado y desagregación como se observa en la figura 5 en ambos materiales con el propósito de prepararlos de manera adecuada para su análisis. Se utilizó un cuarteador metálico que cumplía rigurosamente con las especificaciones detalladas en la normativa M-MMP-1-03/03 de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) para llevar a cabo dicho proceso.

Posteriormente, con el objetivo de obtener porciones representativas que posibilitaran la realización de las pruebas de laboratorio necesarias, se descartó una de las mitades y se seleccionó la otra de forma aleatoria. Este procedimiento se repitió en cuatro ocasiones, ya que se tomaron tres muestras de material pétreo reciclado provenientes de diferentes zonas del banco, y una muestra de material pétreo natural. La decisión de recoger múltiples

muestras del banco de materiales reciclados se fundamentó en lo mencionado previamente en la introducción, donde se destaca que los agregados reciclados suelen exhibir variaciones significativas en sus características, incluso cuando provienen del mismo proveedor. Esta consideración refuerza la importancia de obtener una muestra representativa que abarque la diversidad potencial de estos materiales.

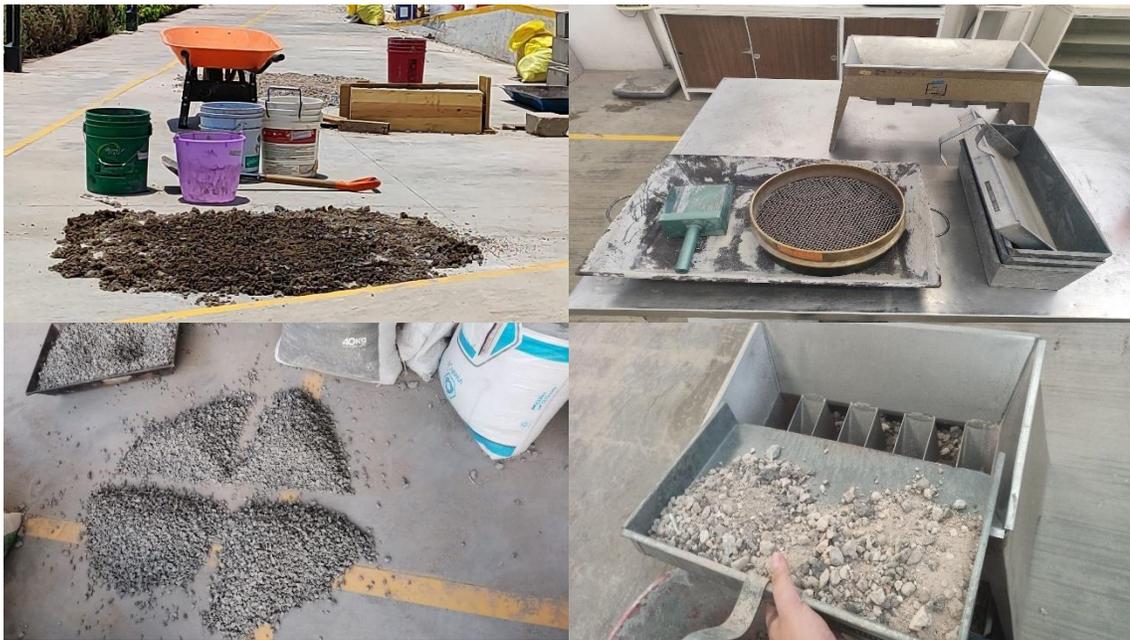


Figura 5: Secado del material, equipo de cuarteo y realización del mismo.

Fuente propia

3.2.3.Recolección de PET en centros de acopio

En este caso el centro de acopio de PET seleccionado se encuentra dentro de la misma UAQ, figura 6, alado del edificio A, este centro de recolección llamado “BaskPET BALL” se utiliza como un centro de acopio de PET de manera interactiva con un aro de Basketball en él se tienen diferentes tipos de PET e incluso otros envases por lo que se recolectaron solo los envases no reciclados anteriormente, color transparente y de agua embotellada en su mayoría.



Figura 6: Centro de acopio BaskPET Ball.

Fuente propia

3.2.3.1. Trituración y limpieza del PET

El PET fue molido en una licuadora, quedando los trozos más chicos en el fondo y trozos más grande en la superficie propiciando una correcta sustitución de la granulometría natural, de tener algún resto de azúcar o tierra se procedo a lavar con agua y unas gotas de jabón de trastes común, el tiempo de molido ideal es de 3 minutos por carga de PET, la recomendación de agua es usar la cantidad necesaria para cubrir en su totalidad las tiras de PET. A continuación se describe a profundidad el proceso de limpieza de las botellas recolectadas.

Como primer paso se recolectaron botellas vacías de envases de agua embotellada y refrescos, algunos de los especímenes se muestran en la figura 7.



Figura 7: Botellas PET.

Fuente propia

El segundo paso implicó la remoción de etiquetas, tapas y arillos del cuello como se muestra en la figura 8



Figura 8: Etiquetas de botellas PET.

Fuente propia

El tercer paso involucra el corte del fondo de las botellas y lo más cercano a la parte superior de cuello como se muestra en la figura 9, esto debido a que al intentar licuarse ese segmento el vaso de la licuadora se fracturo figura 10 y quedo inutilizable por lo que se optó por desechar estos segmentos, además se limpió cualquier resto de tierra y/o bebida que pudiese quedar en ellas con agua y unas gotas de jabón.



Figura 9: Cuellos de botellas y etiquetas botellas PET.

Fuente propia



Figura 10: Vaso de licuadora fracturado

Fuente propia



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO



FACULTAD
DE INGENIERÍA



DIPFI
POSGRADO
INGENIERÍA

El cuarto paso corresponde al corte de las botellas, primero a la mitad y después en tiras finas de 1.5 cm cada una aproximadamente, teniendo un corte posterior a la mitad de estas quedando un tamaño final de 1.5 cm x 7 cm esto debido a que al ser una licuadora con un vaso pequeño y al ser las tiras PET de un peso muy ligero el uso de tamaños muy grandes propicia el atorado de las mismas sin llegar a triturarse, en la figura 11 se observa el primer corte de las botellas a la mitad.



Figura 11: Botellas PET limpias cortadas a la mitad, sin boca ni fondo.

Fuente propia

El paso final involucra la trituración de estas, introduciéndose aproximadamente hasta la mitad del vaso de la licuadora la cantidad de tiras que se puedan y llenando de agua las mismas hasta lograr cubrir las en su totalidad, finalmente, se licua por un tiempo de 3 minutos, pudiendo ser un poco más a criterio del examinador el resultado de esta trituración se puede observar en la figura 12 Estos fragmentos se retiran y se dejan secar al sol hasta que se encuentren secos.



Figura 12: Fragmentos triturado de botellas PET

Elaboración propia

Es importante mencionar que las botellas ocupadas fueron botellas 100% reciclables como se muestra en la figura 13 lo que indica nunca han sido recicladas con anterioridad, descartando de esta manera las botellas que mencionaban en su etiquetado ser botellas 100% de material reciclado



Figura 13: Etiqueta botella 100% reciclable

Elaboración propia

Otro aspecto importante a considerar es el período de descanso entre los ciclos de trituración, ya que la ausencia de estos intervalos incrementa la probabilidad de un fallo en el motor de la licuadora como se aprecia en la figura 14.



Figura 14: Motor de licuadora dañado

Fuente propia

La siguiente etapa, la segunda fase, implica la experimentación, la interpretación de todos los resultados y una breve discusión sobre su significado.

3.3. Fase II

3.3.1. Cementantes

El cemento Portland utilizado fue requerido conforme a las especificaciones establecidas en la normativa NMX-C-414-ONNCCE, lo cual se indicó explícitamente en el empaque del producto como se muestra en la figura 15. Este empaque certifica que el cemento cumple con los estándares de calidad y desempeño establecidos en dicha norma, asegurando así que el material es adecuado para su uso en aplicaciones de construcción según los lineamientos nacionales vigentes.



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO



FACULTAD
DE INGENIERÍA



DIPFI
POSGRADO
INGENIERÍA



Figura 15: Especificación NMX-C-414-ONNCCE cemento

Fuente propia

3.3.2. Pétreos

3.3.2.1. Análisis granulométrico

Siguiendo las directrices establecidas por la normativa SCT M-MMP-1-06/03, se llevó a cabo un análisis granulométrico de ambas muestras utilizando el equipo proporcionado por el laboratorio siendo este un juego de mallas completo, observado en la figura 16. Este ensayo tiene como objetivo principal identificar la distribución de tamaños de las partículas presentes en los materiales pétreos utilizados en el proyecto. Los resultados obtenidos desempeñan un papel fundamental al proporcionar información crucial sobre la variabilidad en los tamaños de partículas, aspecto esencial en el proceso de diseño y construcción.

En total, se realizaron cuatro análisis granulométricos, de los cuales tres se enfocaron en los agregados reciclados y uno en los agregados naturales. Estos análisis no solo cumplen con los requisitos normativos, sino que también contribuyen significativamente al entendimiento detallado de la distribución de tamaños de las partículas en los materiales, lo cual resulta vital para el desarrollo preciso y eficiente del proceso de diseño y construcción.



Figura 16: Juego de mallas

Fuente propia



La tabla de distribución granulométrica de los agregados reciclados, tabla 13, se muestra a continuación.

Tabla 13: Granulometría material reciclado

Material reciclado						
Malla (retenido)	Costal 1 (gr)	Costal 2 (gr)	Costal 3 (gr)	%	%	%
3/4"	25.6	139	64.7	0.98	2.97	1.58
1/2"	252.3	792.3	354.2	9.62	16.91	8.63
3/8"	147.7	484	233.7	5.63	10.33	5.69
1/4"	427.3	632.9	388.7	16.29	13.51	9.47
No.4	183	258.2	155.1	6.98	5.51	3.78
No.10	533.1	881.8	882	20.32	18.82	21.49
No.20	261.7	390.3	516.8	9.97	8.33	12.59
No.40	200.4	741.5	726	7.64	15.83	17.69
No.60	226.5	139.4	402.6	8.63	2.98	9.81
No.100	226	94.7	283.2	8.61	2.02	6.90
No.200	118.6	106.6	91.6	4.52	2.28	2.23
Pasa 200	21.4	24.3	6.5	0.82	0.52	0.16
	2623.6	4685	4105.1	100.00	100.00	100.00

Fuente propia

A continuación en la figura 17 se muestran todas las mediciones de lo retenido en cada malla en el primer costal de material reciclado.

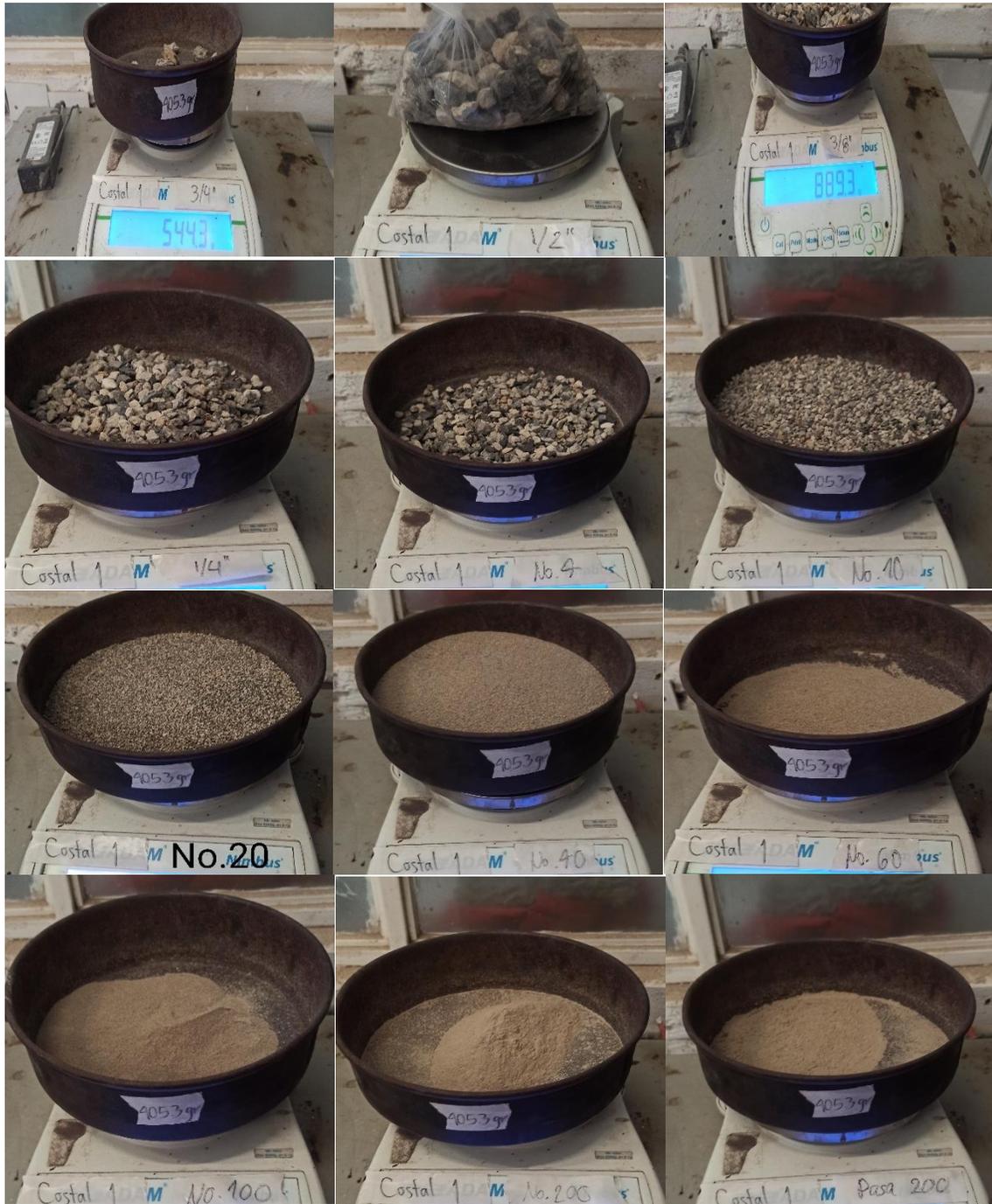


Figura 17: Material reciclado costal 1 obtenido de cada malla

Fuente propia

A continuación en la figura 18 se muestran todas las mediciones de lo retenido en cada malla en el segundo costal de material reciclado.

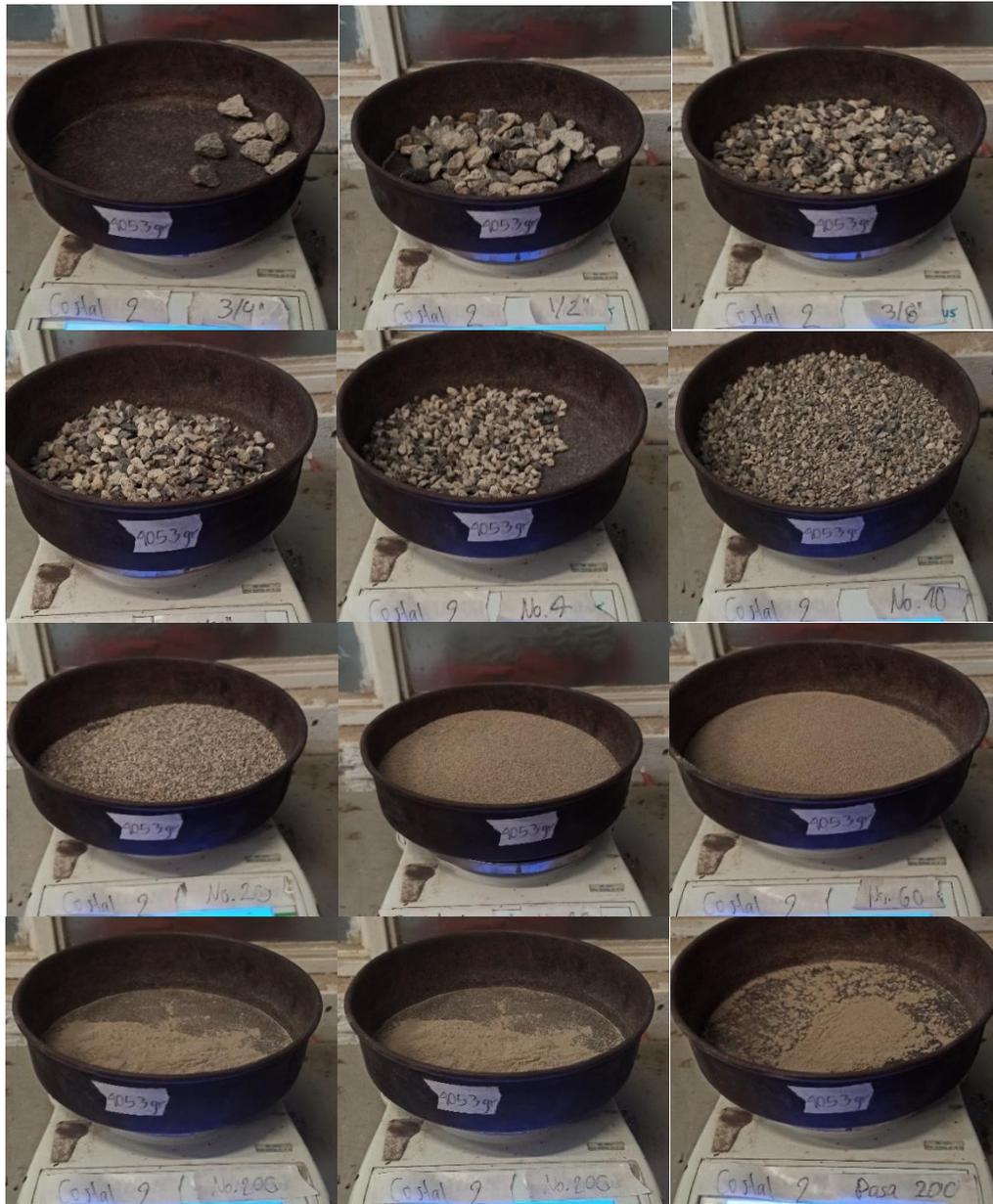


Figura 18: Material reciclado costal 2 obtenido de cada malla

Fuente propia

A continuación en la figura 19 se muestran todas las mediciones de lo retenido en cada malla en el tercer costal de material reciclado.



Figura 19: Material reciclado costal 3 obtenido de cada malla

Fuente propia



La tabla de distribución granulométrica de los agregados naturales se muestra a continuación en la tabla 14.

Tabla 14: Granulometría material natural

Material natural		
Malla (retenido)	Costal 1 (gr)	%
1 1/2"	526.7	6.60
1"	1264.9	15.84
3/4"	731.7	9.16
1/2"	1257.7	15.75
3/8"	301.1	3.77
1/4"	932.8	11.68
No.4	416.5	5.22
No.10	1286.6	16.11
No.20	634.8	7.95
No.40	299.8	3.75
No.60	101.2	1.27
No.100	75.2	0.94
No.200	75.2	0.94
Pasa 200	82.1	1.03
	7986.3	100.00

Elaboración propia

A continuación en la figura 20 se muestran todas las mediciones de lo retenido en cada malla en la granulometría del material natural.

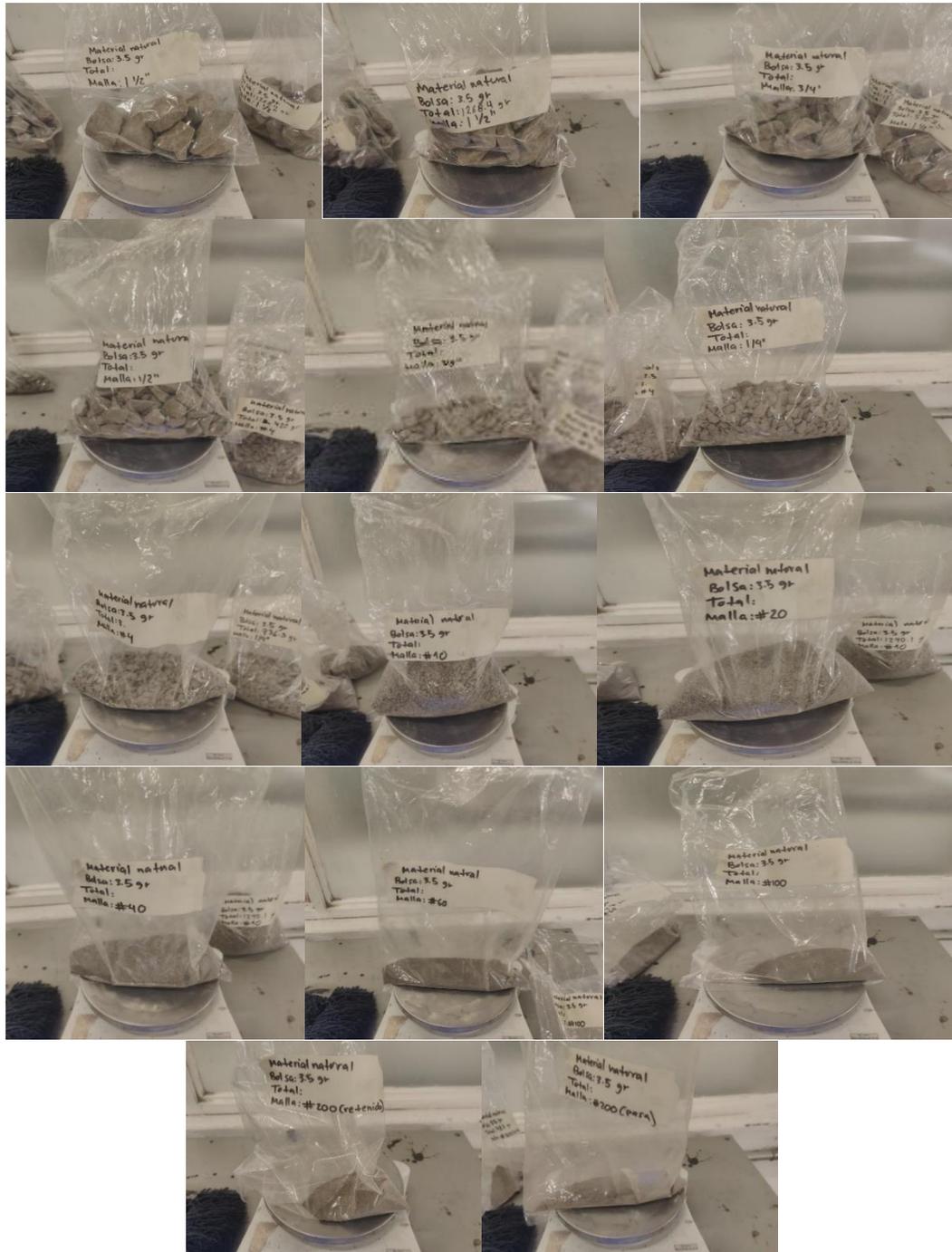


Figura 20: Material natural obtenido de cada malla

Fuente propia

De manera más visual se presenta una gráfica en la figura 21 de curva granulométrica con los datos obtenidos en la tabla 13 y la tabla 14.

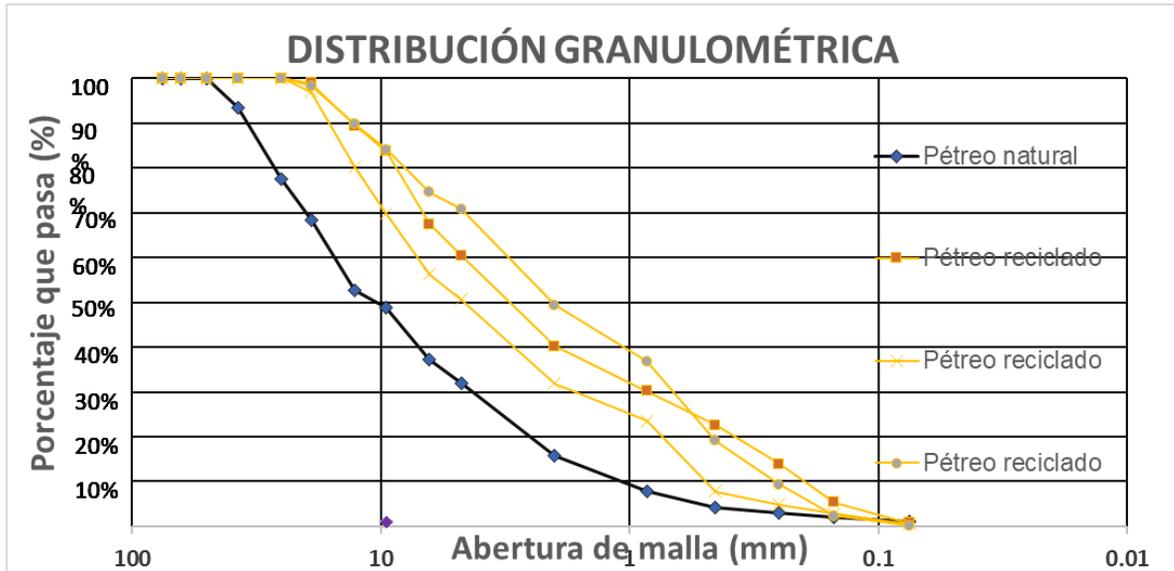


Figura 21: Curvas granulométricas materiales reciclados y material natural.

Elaboración propia, imágenes de uso libre en Google.

3.3.2.2. Peso unitario y vacíos

La norma ASTM C29-17, titulada "*Standard Test Method for Bulk Density ('Unit Weight') and Voids in Aggregate*", es una especificación desarrollada por la *ASTM International* que establece los métodos para determinar la densidad aparente (peso unitario) y los vacíos en los agregados, en la figura 22 se muestran las diferentes mediciones de las gravas y arenas tanto de agregado natural mientras que en la figura 23 se observan las mediciones de gravas y arenas del agregado reciclado.

El cálculo de la densidad aparente (peso unitario) y los vacíos en los agregados es importante dado que estos parámetros influyen directamente en el comportamiento de las mezclas de concreto. La densidad aparente del agregado es clave porque influye en el peso total de la mezcla de concreto, lo cual impacta en las propiedades de la mezcla, como la resistencia y la durabilidad. Conocer estos valores es esencial para optimizar el diseño de mezclas, controlar

la homogeneidad del concreto y ajustar las proporciones de los materiales para lograr un desempeño adecuado en función de las exigencias de resistencia y durabilidad. Además, permite evaluar cómo los cambios en los tipos de agregados, como la incorporación de materiales reciclados como el PET, pueden alterar estas propiedades y cómo deben ajustarse las mezclas para obtener resultados satisfactorios.



Figura 22: Mediciones de peso unitario y vacíos de grava y arena material natural

Fuente propia

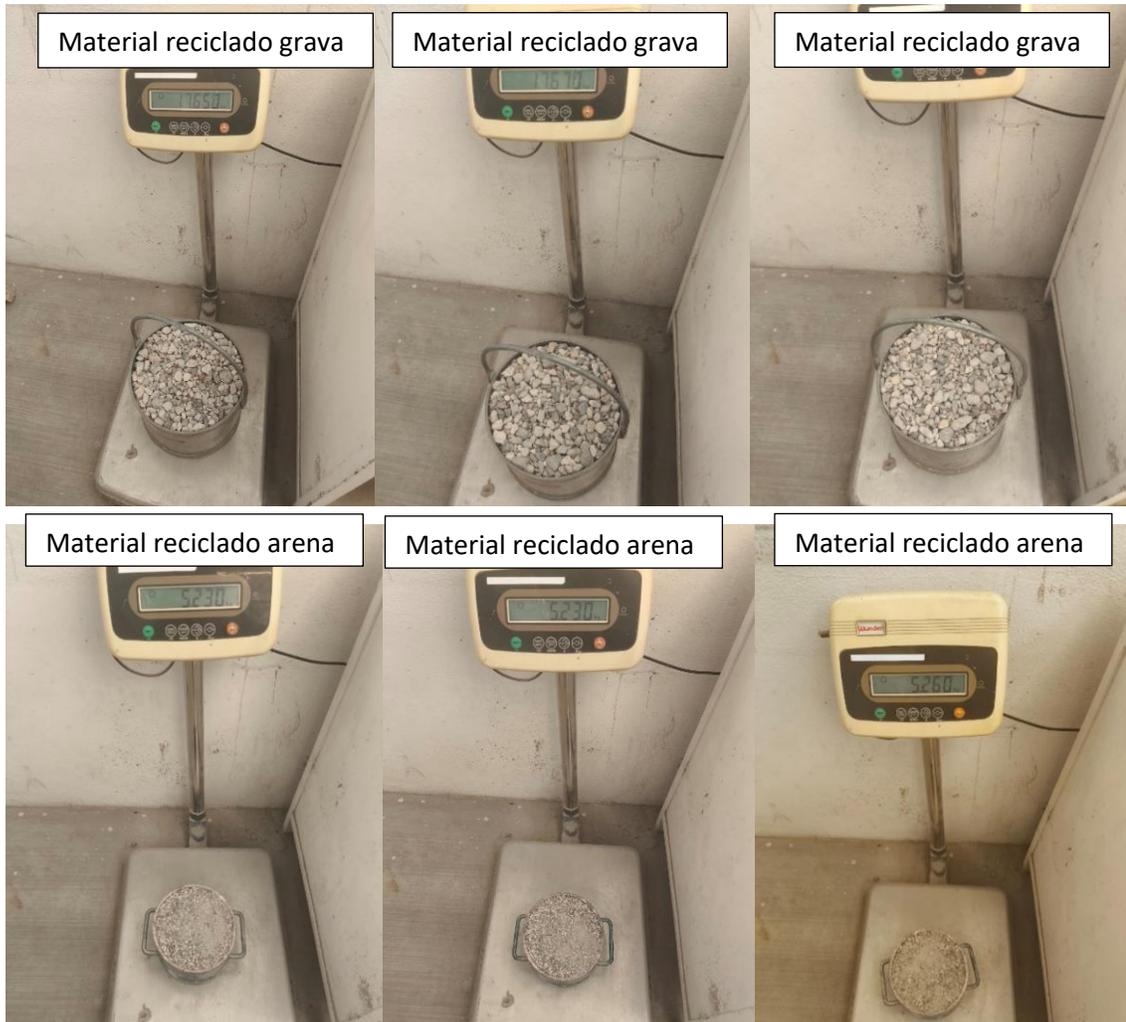


Figura 23: Mediciones de peso unitario y vacíos de grava y arena material reciclado

Fuente propia

Se presentan también los valores obtenidos en la siguiente imagen, teniendo los valores de grava (G) y arena (A) en la tabla 15.



Tabla 15: Valores de peso unitario y vacíos de grava y arena material natural y reciclado

AGREGADOS					
G	Volumen recipiente:	0.00969	G	Volumen recipiente:	0.00969
	Peso recipiente:	3.91		Peso recipiente:	3.91
A	Volumen recipiente:	0.00235	A	Volumen recipiente:	0.00225
	Peso recipiente:	2.26		Peso recipiente:	2.379

Grava natural:		Arena natural		Grava reciclado:		Arena reciclado	
12.27	kg	3.12	kg	13.74	kg	2.85	kg
12.28	kg	3.23	kg	13.76	kg	2.85	kg
12.36	kg	3.22	kg	13.83	kg	2.88	kg
12.303		3.190		13.777		2.861	
PROMEDIO		PROMEDIO		PROMEDIO		PROMEDIO	
1269.694	kg/m ³	1357.447	kg/m ³	1421.741	kg/m ³	1271.556	kg/m ³
PESO UNITARIO		PESO UNITARIO		PESO UNITARIO		PESO UNITARIO	

Elaboración propia

3.3.2.3. Densidad, densidad relativa y absorción

La norma ASTM C128-12, titulada "*Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate*", es una especificación desarrollada por la ASTM International que establece los métodos para determinar la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino, parte del proceso de determinación de estos parámetros se puede observar en la figura 24.

Estos parámetros proporcionan información esencial sobre el comportamiento de los agregados finos (como la arena) en la mezcla de concreto y cómo interactúan con otros componentes, como el cemento y el agua. A continuación se explica la importancia de cada uno de estos parámetros:

Densidad: La densidad del agregado fino es fundamental para determinar el peso unitario del material, lo cual afecta directamente la dosificación de la mezcla.

Densidad relativa (gravedad específica): La gravedad específica se refiere a la relación entre la densidad del agregado y la densidad del agua. Este parámetro es importante porque proporciona una indicación de la "pesadez" del material. Un agregado con mayor gravedad específica generalmente tiene mayor resistencia, lo que es beneficioso para la calidad del concreto.

Absorción: La absorción se refiere a la capacidad del agregado para retener agua en su estructura porosa. Este parámetro es crucial porque afecta la cantidad de agua disponible para la hidratación del cemento en la mezcla de concreto. Si el agregado fino tiene una alta absorción, puede extraer agua de la pasta de cemento, lo que puede disminuir la trabajabilidad de la mezcla y afectar negativamente su resistencia final. Además, la absorción también influye en la dosificación y en la necesidad de ajustar el contenido de agua para evitar que la mezcla se vuelva demasiado seca o, por el contrario, demasiado líquida.

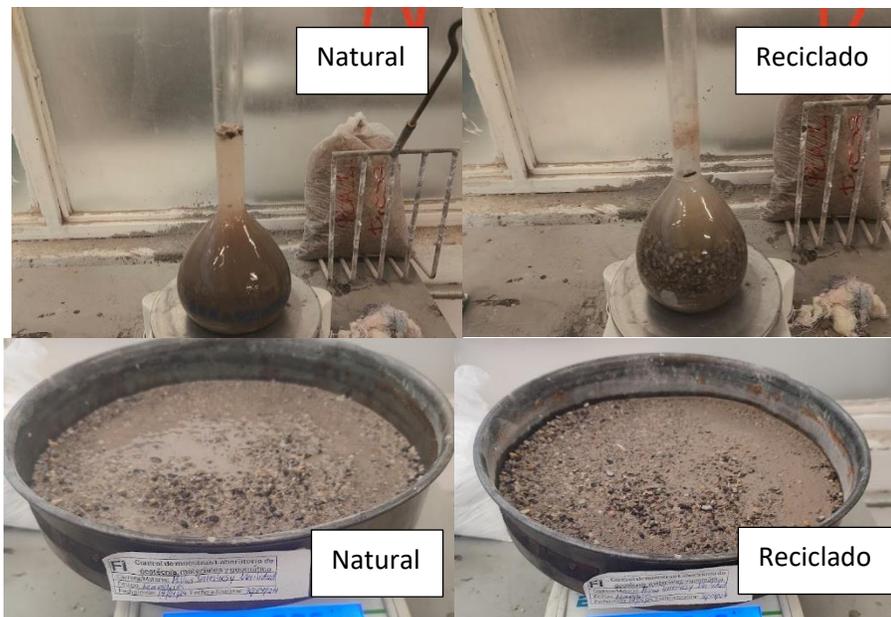


Figura 24: Parte del proceso de obtención de densidad, densidad relativa y absorción

Fuente propia



Los valores obtenidos de densidad relativa, densidad relativa aparente y absorción para agregados naturales se presentan en la figura 25 mientras que estos mismo parámetros de agregados reciclado se presentan en la figura 26.

Procedimiento gravimetrico densidad relativa (natural)	
$Densidad\ relativa: \frac{A}{(B + S - C)}$	
A=	masa de muestra seca del horno, g
B=	masa de picnómetro llena de agua, hasta la marca de calibración, g
C=	masa de picnómetro llena de muestra y agua hasta la marca de calibración, g
S=	masa de muestra saturada de superficie seca, o para absorción con ambos procedimientos, g
A=	500 g
B=	500.5 g
S=	502.085071 g
C=	752.7 g
Densidad relativa: 2.00091986	
Procedimiento gravimetrico densidad relativa aparente (natural)	
$Densidad\ relativa\ aparente: \frac{A}{(B + A - C)}$	
A=	masa de muestra seca del horno, g
B=	masa de picnómetro llena de agua, hasta la marca de calibración, g
C=	masa de picnómetro llena de muestra y agua hasta la marca de calibración, g
A=	500 g
B=	500.5 g
C=	752.7 g
Densidad relativa: 2.01775626	
Resistencia muy alta a la deformación, puede causar problemas con infiltración y aumentar riesgo de escorrentías superficiales.	
Norma M-MMP-1-05/03	
Absorción natural	
$W_{ab} = \frac{W_1 - W_s}{W_s} \times 100$	
W_{ab} =	Absorción del material
W_1 =	Masa del material saturado y superficialmente seco (g)
W_s =	Masa del material secado al horno (g)
W_1 =	362.7 g
W_s =	359.7 g
W_{ab} =	0.83%

Figura 25: Procedimiento cálculo de densidad, densidad relativa y absorción material natural.

Fuente propia



Procedimiento gravimetrico densidad relativa (reciclado)	
$Densidad\ relativa: \frac{A}{(B + S - C)}$	
A=	masa de muestra seca del horno, g
B=	masa de picnómetro llena de agua, hasta la marca de calibración, g
C=	masa de picnómetro llena de muestra y agua hasta la marca de calibración, g
S=	masa de muestra saturada de superficie seca, o para absorción con ambos procedimientos, g
A=	500 g
B=	501.2
S=	533.668328
C=	746
$Densidad\ relativa: 1.73089242$	
Un suelo con alta densidad es favorable, ya que proporciona una base más estable y menos susceptible a la compactación adicional bajo cargas.	

Procedimiento gravimetrico densidad relativa aparente (reciclado)	
$Densidad\ relativa\ aparente: \frac{A}{(B + A - C)}$	
A=	masa de muestra seca del horno, g
B=	masa de picnómetro llena de agua, hasta la marca de calibración, g
C=	masa de picnómetro llena de muestra y agua hasta la marca de calibración, g
A=	500 g
B=	501.2 g
C=	746 g
$Densidad\ relativa: 1.95924765$	

Norma M-MMP-1-05/03	
Absorción reciclado	
$W_{ab} = \frac{W_1 - W_s}{W_s} \times 100$	
W_{ab} =	Absorción del material
W_1 =	Masa del material saturado y superficialmente seco (g)
W_s =	Masa del material secado al horno (g)
W_1 =	2071.8 g
W_s =	1825.9 g
W_{ab} =	13.47%

Figura 26: Procedimiento cálculo de densidad, densidad relativa y absorción material reciclado.

Fuente propia

3.3.2.4. Desgaste de los ángeles

El propósito de la prueba es establecer la capacidad de resistencia al desgaste de los materiales pétreos. Esta muestra se coloca dentro de un cilindro en constante rotación como el mostrado en la figura 27 , donde será expuesta al impacto de esferas metálicas como las observadas en la figura 28 durante un periodo predefinido de tiempo como lo menciona la normativa M-MMP-1-06/03. El objetivo principal es medir la variación granulométrica experimentada por la muestra tras someterse a esta evaluación.

El enfoque para cuantificar el desgaste se realiza al analizar la diferencia en la masa del material que logra pasar a través de la malla número 12 antes y después de someterse a la mencionada prueba. Esta diferencia en masa es considerada como un indicador directo de la capacidad del material para resistir el deterioro ocasionado por el impacto de las esferas metálicas.



Figura 27: Equipo para prueba de desgaste de los Ángeles

Fuente propia



Figura 28: Material para prueba de desgaste de los Ángeles

Fuente propia

Las mallas ocupadas para la segregación del material, el proceso de lavado después de los ciclos de rotación con las esferas y el pesado del mismo se muestran a continuación en la figura 29.



Figura 29: Mallas, lavado y pesado del material después de la prueba del desgaste de los Ángeles

Fuente propia



De acuerdo con la normativa de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), el **cálculo del desgaste de Los Ángeles** se obtiene mediante la ecuación 1:

$$Pa = \left(\frac{P_i - P_f}{P_i} \right) * 100 \quad [1]$$

donde P_i es el peso inicial de la muestra y P_f es el peso final después del ensayo.

Para el **material de banco de materiales pétreos naturales**, se obtuvo:

$$Pa = \left(\frac{4610 \text{ gr} - 3600 \text{ gr}}{4610 \text{ gr}} \right) * 100 = 21.9\%$$

Para el **material de banco de materiales pétreos reciclados**, el resultado fue:

$$Pa = \left(\frac{2505.2 \text{ gr} - 1568.1 \text{ gr}}{2505.2 \text{ gr}} \right) * 100 = 37.41\%$$

Estos resultados indican los porcentajes de desgaste correspondientes a cada tipo de material, evaluando su durabilidad y resistencia en función del ensayo de desgaste de Los Ángeles.

3.3.2.5. Intemperismo acelerado

Según la normativa mexicana N-MMP-4-04-008/03 de la SCT, la evaluación pretende identificar la posible erosión causada por las condiciones climáticas en los materiales pétreos utilizados en las mezclas de asfalto. El procedimiento involucra exponer las diversas dimensiones de la fracción de agregados gruesos (grava) en una muestra de materiales pétreos a ciclos repetidos de saturación y secado en la figura 30 se puede apreciar una muestra en este proceso. Esto se logra al sumergir los agregados en una solución altamente concentrada de sulfato de sodio o magnesio, y luego medir la variación de su peso antes y después de este tratamiento como se presenta. El clima puede provocar ciclos de humedad y sequedad que afectan a los materiales utilizados en la construcción, el uso de sulfatos (como el sulfato de sodio o magnesio) en este ensayo simula estos ciclos climáticos de manera más controlada, ayudando a predecir cómo se comportarán los agregados en el campo y si son aptos para soportar condiciones extremas sin perder propiedades estructurales este procedimiento

también permite medir la resistencia de los agregados gruesos a la degradación química y física, lo que es crucial para seleccionar materiales adecuados que garanticen un comportamiento estable y confiable.



Figura 30: Material reciclado en uno de los ciclos de secado de la prueba de Intemperismo.

Fuente propia

El **intemperismo representativo** de todo el material se determina mediante la ecuación 2:

$$P_{INT} = \left(\frac{\sum(P_{(t)} \times M_i)}{\sum M_i} \right) \times 100 \quad [2]$$

Para el material de banco natural, el cálculo resultó en:

$$P_{INT} = \left(\frac{800 \text{ gr} - 700 \text{ gr}}{800 \text{ gr}} \right) \times 100 = 12.5\%$$

Mientras que para el material de banco reciclado, se obtuvo:

$$P_{INT} = \left(\frac{800.8 \text{ gr} - 791.3 \text{ gr}}{800.8 \text{ gr}} \right) \times 100 = 1.19\%$$

Estos resultados sugieren que el material reciclado posee mayor resistencia al Intemperismo, posiblemente debido a su composición, en la cual predomina el concreto triturado.

3.3.2.6. Desgaste micro-deval

El ensayo Micro-Deval es una prueba que evalúa la resistencia a la abrasión y la durabilidad de un agregado mineral, resultado de la combinación de diversos factores, incluyendo la acción de abrasión y trituración con bolas de acero en presencia de agua de acuerdo con la normativa ASTM D 6928-06. Para este ensayo, se utiliza una muestra con triturado estándar en el equipo observado en la figura 31, que se satura en agua durante al menos una hora.

La cantidad de material resultante del desgaste es determinada al medir la porción que logra pasar a través de una malla con una abertura de 1,18 mm (No. 16).



Figura 31: Maquinaria para la prueba de desgaste micro-deval

Fuente propia

Según la normativa ASTM, el cálculo del desgaste micro-Deval se realiza mediante la siguiente ecuación 3:

$$P_{INT} = \left(\frac{\sum (P_{(t)} \times M_i)}{\sum M_i} \right) \times 100 \quad [3]$$

Para el material de banco de origen pétreo natural, se obtuvo:

$$P_{INT} = \left(\frac{800 \text{ gr} - 700 \text{ gr}}{800 \text{ gr}} \right) \times 100 = 12.5\%$$

Para el material de banco de origen reciclado, el resultado fue:

$$P_{INT} = \left(\frac{800.8 \text{ gr} - 791.3 \text{ gr}}{800.8 \text{ gr}} \right) \times 100 = 1.19\%$$

Este valor es similar al desgaste obtenido en la prueba de Los Ángeles, lo que confirma y complementa los resultados de cada ensayo, indicando una calidad aceptable del material pétreo dependiendo su uso.

Los materiales y equipos ocupados para la realización de esta prueba se muestran a continuación en la figura 32.



Figura 32: Bolas de acero, mallas y maquinaria para el desgaste micro-deval

Fuente propia

El pesado inmediatamente después de la prueba y una vez secado al horno se puede apreciar en la figura 33.



Figura 33: Pesado de material reciclado antes y después del secado

Fuente propia

3.3.2.7. Límites de Atterberg:

De acuerdo con la normativa M-MMP-1-07-07 estas pruebas ofrecen información acerca de las propiedades de deformación de la fracción de materiales para terraplenes que pasa a través de la malla N°40 (0.425 mm), siendo fundamental para la identificación y clasificación de los suelos. El proceso involucra la determinación del límite líquido, el cual representa el contenido de agua en el que un suelo plástico muestra una resistencia al corte de 2.45 kPA (25 g/cm²), marcando la transición entre estados semilíquidos y plásticos. Asimismo, se evalúa el límite plástico, indicando el contenido de agua en el cual un cilindro de suelo se rompe en tres partes al alcanzar un diámetro de 3 mm, marcando la transición entre estados plásticos y semisólidos. El índice plástico se obtiene como la diferencia entre los límites líquido y plástico.

Durante las pruebas observadas en la figura 34, se descubrió que ambos finos de los pétreos eran poco plásticos, lo que dificultó la aplicación de los límites de Atterberg mediante la copa de casa grande y los churritos de 3 mm. Se realizó una prueba adicional para evaluar el comportamiento con la humedad, utilizando el método de cono de penetración.



Figura 34: Intento de prueba de Copa de Casagrande.

Fuente propia

Método del cono de penetración.

La norma BS 1377-2:1990 describe el Ensayo del Cono de Caída para determinar el límite líquido del suelo, en el cual un cono estandarizado se deja caer sobre una muestra de suelo para medir su profundidad de penetración a diferentes humedades. Este límite líquido es un parámetro importante para clasificar suelos y predecir su comportamiento en función de la humedad, siendo especialmente útil en suelos con baja plasticidad como los limosos y arenosos.

Los distintos valores de penetración obtenidos en el material fino de los agregados naturales se observan en la figura 35, además se anexa la figura 36 donde se determina el contenido de humedad de los mismos por medio de secado al horno.



Figura 35: Valores de penetración (mm) material natural
Fuente propia



Figura 36: Contenido de humedad de las distintas penetraciones (gr), material natural
Elaboración propia

Los distintos valores de penetración obtenidos en el material fino de los agregados reciclados se observan en la figura 37, además se anexa la figura 38 donde se determina el contenido de humedad de los mismos por medio de secado al horno, los finos utilizados para esta prueba provienen de una mezcla de los tres costales obtenidos.



Figura 37: Valores de penetración (mm) material reciclado

Fuente propia

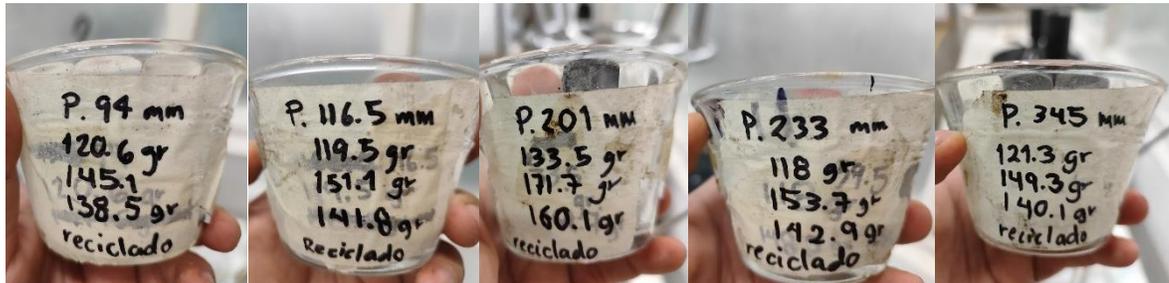


Figura 38: Contenido de humedad de las distintas penetraciones (gr), material reciclado
Elaboración propia

Los resultados de limite liquido, plastico e indice plasticos obtenidos para los materiales naturales y reciclados se presentan en la figura 39, los formatos utilizados para el calculo se encuentran en los anexos.

RESULTADOS NATURAL		RESULTADOS RECICLADO	
LÍMITE LÍQUIDO, WL [%]	23	LÍMITE LÍQUIDO, WL [%]	35
LÍMITE PLÁSTICO, WP [%]	22	LÍMITE PLÁSTICO, WP [%]	34.4
ÍNDICE PLÁSTICO, IP [%] $I_p = W_L - W_p$	1.00	ÍNDICE PLÁSTICO, IP [%] $I_p = W_L - W_p$	0.60
ML: Clasificado como un limo de baja compresibilidad; mezcla de limo de baja plasticidad, arena y grava; polvo de roca.		ML: Clasificado como un limo de baja compresibilidad; mezcla de limo de baja plasticidad, arena y grava; polvo de roca.	

Figura 39: Resultados de Limite líquido, límite plástico e índice plástico en material natural y reciclado.

Elaboración propia

3.3. Diseño de mezclas de concreto hidráulico con PET en diferentes proporciones y mezcla convencional

Se hizo una prueba de cantidad de material para dosificar cada cilindro de 10x20cm en el cual se obtuvo que para un cilindro de 10x20 cm era necesario 0.8607 kilos de arena, 1.0637 kilos de grava, 0.3635 litros de agua y 0.546 kilos de cemento, esto siguiendo las

especificaciones de proporciones proporcionadas por el empaque del cemento, este cálculo se realizó a fin de evitar el mayor desperdicio de mezcla al momento de realizar los cilindros.

La elección del molde de **10 x 20 cm** mostrados en la figura 40 respondió a dos consideraciones fundamentales: en primer lugar, la optimización de recursos y, en segundo lugar, la reducción del peso de los especímenes, ya que su manipulación con moldes de mayor tamaño habría sido considerablemente más complicada y, en algunos casos, imposible para su transporte.



Figura 40: Moldes de 10x20 usados para los cilindros

Elaboración propia

Finalmente, las elecciones de porcentajes de PET en 1%, 5% y 7% corresponden a lo establecido en la justificación de este documento.

En total se realizaron 60 cilindros debido a que se ocuparon 3 muestras de cada tipo a sus diferentes días de curado para poder tener un parámetro más adecuado, esto se ve de manera gráfica en la tabla 16.

Tabla 16: Calculo de la cantidad de cilindros a elaborar.

CILINDROS						CILINDROS
DIAS	Convencional	Con reciclado	Reciclado+PET			
			1%	5%	7%	
14	3	3	3	3	3	30
28	3	3	3	3	3	
TOTAL	6	6	6	6	6	
CILINDROS ACOSTADOS						CILINDROS ACOSTADOS
DIAS	Convencional	Con reciclado	Reciclado+PET			
			1%	5%	7%	
14	3	3	3	3	3	30
28	3	3	3	3	3	
TOTAL	6	6	6	6	6	

Fuente: Elaboración propia

Además, se ocupó una revolvedora de concreto eléctrica 1/2 Saco 3/4 Hp marca Oakland figura 41 para obtener una correcta homogenización, con las pruebas iniciales se calculó una pérdida de lo equivalente a 5 cilindros de 10x20 cm por pegado en paredes y vertido en carretilla por lo que se trabajó en lo equivalente a 18 cilindros, tabla 17, con lo cual se obtuvo también el concreto para la densidad y revenimiento.



Figura 41: Revolvedora ocupada en la elaboración de todas las mezclas

Fuente propia



Tabla 17: Cantidad de material necesario para cada tipo de mezcla en revolvedora.

Para 18 cilindros (Pérdida de 5 en la revolvedora aproximadamente)				
Valores base	15.4926	19.1466	6.543	9.828
	Arena (kg)	Grava (kg)	Agua (L)	Cemento (Kg)

Elaboración propia

Los valores adecuados a los requerimientos de PET para el concreto de cada tipo así como la adecuación por absorción se muestran a continuación en la tabla 18, estos toman en consideración la sustitución del agregado grueso y fino por PET en relación con el peso.

Tabla 18: Dosificación de materiales para cada tipo de mezcla

	Arena (kg)	Grava (kg)	Agua (L)	Cemento (Kg)	PET
Natural	15.4926	19.1466	6.5976	9.828	N/A
Solo reciclado	15.4926	19.1466	7.4242	9.8280	N/A
PET 1%	15.4151	19.0509	7.4242	9.8280	0.1732
PET 5%	15.1053	18.6679	7.4242	9.8280	0.8660
PET 7%	14.9504	18.4765	7.4242	9.8280	1.2124
TOTAL	60.9634	75.3419	29.6967	39.3120	2.2515

Elaboración propia

En este caso las dosificaciones para el material natural serán idénticas al material reciclado a excepción del agua por la corrección por absorción.

3.3.4. Ensayos para la evaluación de la calidad de las mezclas en fresco

La evaluación de la calidad de las mezclas es esencial para asegurar su desempeño y durabilidad en proyectos de construcción, mediante ensayos específicos, se determinan propiedades clave que garantizan el cumplimiento de los estándares necesarios para su

adecuado uso en diversas aplicaciones estructurales, a continuación se mostraran apartados con las diferentes pruebas efectuadas en las mezclas.

3.3.4.1. Densidad (peso unitario)

Este ensayo es fundamental para controlar la calidad del concreto en obra, ya que permite verificar que el concreto cumple con las especificaciones de diseño en términos de peso, volumen y proporción de componentes. Además, la densidad obtenida es utilizada para calcular otros parámetros importantes, como el contenido de aire, que influye en la durabilidad del concreto, y el rendimiento, que asegura que se esté produciendo el volumen adecuado para la aplicación, en la figura 42 se observan todas las muestras obtenidas de las diferentes mezclas.

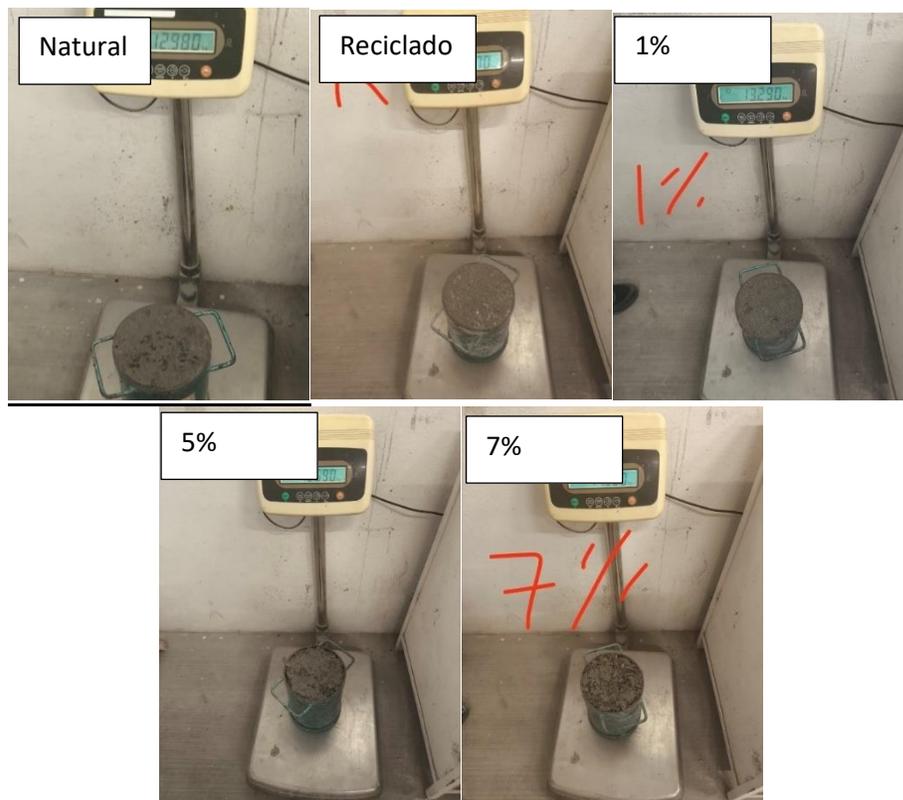


Figura 42: Densidad del concreto de las diferentes mezclas

Fuente propia



Los resultados numéricos obtenidos de esta prueba se enlistan a continuación en la tabla 19.

Tabla 19: Valores de pesos unitarios de las distintas mezclas de concreto.

CONCRETO					
Volumen recipiente:		0.00499			
Peso recipiente:		2.87			
Tipo				PESOS UNITARIOS	
Natural	10.11	kg		2026.052	kg/m ³
Reciclado	10.2	kg		2044.088	kg/m ³
1%	10.42	kg		2088.176	kg/m ³
5%	9.82	kg		1967.936	kg/m ³
7%	9.11	kg		1825.651	kg/m ³

Elaboración propia

3.3.4.2. Revenimiento

Este ensayo mide la trabajabilidad del concreto, es decir, su facilidad de manejo y colocación, a través de la altura de asentamiento de una muestra. Los resultados permiten verificar si la mezcla cumple con las especificaciones de diseño en términos de fluidez y facilidad de colocación, siendo clave para asegurar la calidad del concreto en obra y su adecuada aplicación en diferentes condiciones y tipos de estructuras.

Se realizó una medición por mezcla realizada dado que se mezcló la cantidad necesaria para el colado en los moldes de los 12 cilindros necesarios tanto para compresión como para tensión, en la figura 43 se muestran las mediciones realizadas en cada una de las mezclas mientras que en la tabla 20 se detalla numéricamente estos resultados.

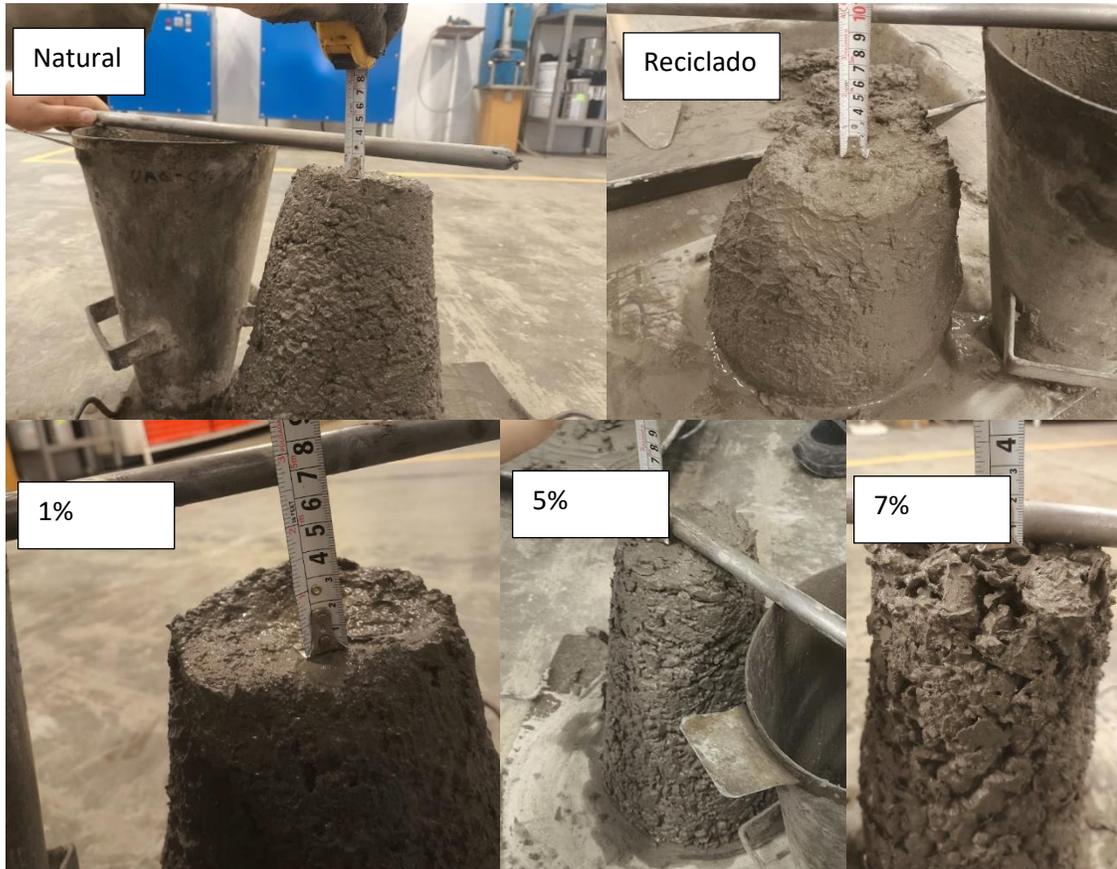


Figura 43: Mediciones de revenimiento de las distintas mezclas

Fuente propia

Tabla 20: Resultados de los revenimientos de las distintas mezclas

Tipo de mezcla	Revenimiento	
Agregado natural:	3	cm
Agregado reciclado:	10	cm
Reciclado+1% PET:	6.5	cm
Reciclado+5% PET:	1	cm
Reciclado+7% PET:	0.3	cm

Elaboración propia

3.3.5. Vaciado en moldes y desmoldado

Comúnmente de dimensiones 15 cm de diámetro por 30 cm de altura o 10 cm por 20 cm, siendo los de 10 cm por 20 cm los ocupados, antes del vertido del concreto se limpian y engrasan los moldes posteriormente se llena el molde en capas, compactando cada capa mediante varillado, el objetivo es eliminar vacíos y asegurar una compactación uniforme sin causar segregación del concreto. Los cilindros deben desmoldarse después de 24 horas de haber sido elaborados, en la figura 44 se observan los moldes y desmoldado de las distintas mezclas



Figura 44: Distintas mezclas en su molde y textura de desmoldado.
Fuente propia

3.3.6. Curado de cilindros

Después del desmoldado, los cilindros deben trasladarse a un tanque de curado con agua a una temperatura controlada de 23 ± 2 °C o a una cámara húmeda con humedad relativa cercana al 100%, el curado de las distintas mezclas se observa en la figura 45.

Los cilindros se deben mantener en estas condiciones hasta el momento del ensayo, ya que un curado adecuado es esencial para obtener resultados representativos de la resistencia real del concreto.

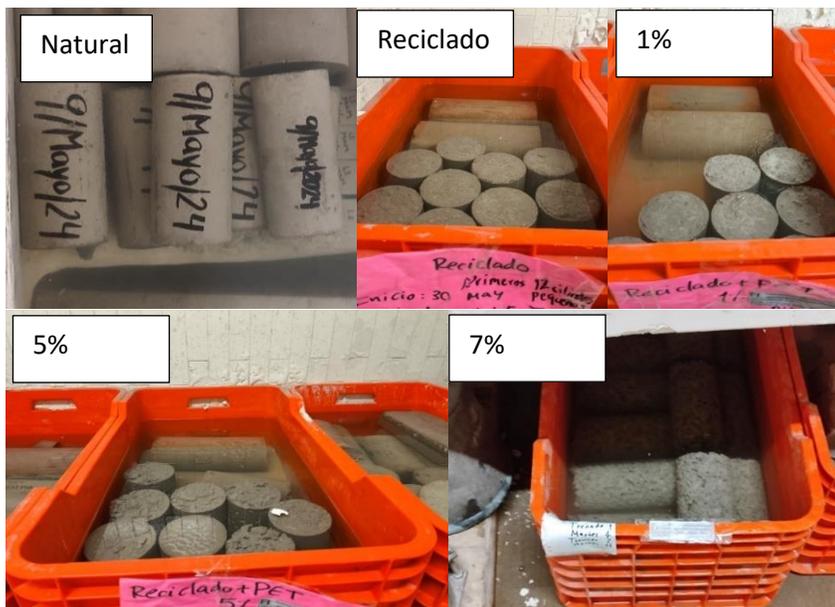


Figura 45: Distintos cilindros en proceso de curado

Fuente propia

3.3.7. Neopreno

La norma que regula el uso de neopreno para pruebas de compresión en concreto es la ASTM C1231 (específicamente, ASTM C1231/C1231M), titulada "*Standard Practice for Use of Unbonded Caps in Determination of Compressive Strength of Hardened Concrete Cylinders*". Esta norma describe los requisitos para el uso de almohadillas de neopreno en

ensayos de compresión de cilindros de concreto este permite una distribución uniforme de la carga durante el ensayo, evitando concentraciones de estrés y mejorando la precisión de los resultados, en la figura 46 se muestran las almohadillas de neopreno ocupadas en las pruebas de compresión, se optó por el uso de éstas dado que el uso de azufre para el calzado de los cilindros representa un método más dañino para el ambiente así como para la salud de las vías respiratorias.



Figura 46: Empaques de neopreno

Fuente propia

3.3.8. Pruebas en concreto sólido

3.3.8.1. Resistencia a la compresión simple

Los cilindros se prueban a la edad especificada (14 y 28 días) para evaluar la resistencia a la compresión, lo cual es fundamental para validar la calidad del concreto respecto a la mezcla convencional.

En la figura 47 se observan todas las fallas críticas presentadas por los cilindros de material natural, reciclado y reciclado con las diferentes proporciones de PET al 1%,5% y 7% a los 14 días y en la figura 48 se observan las fallas a los 28 días.

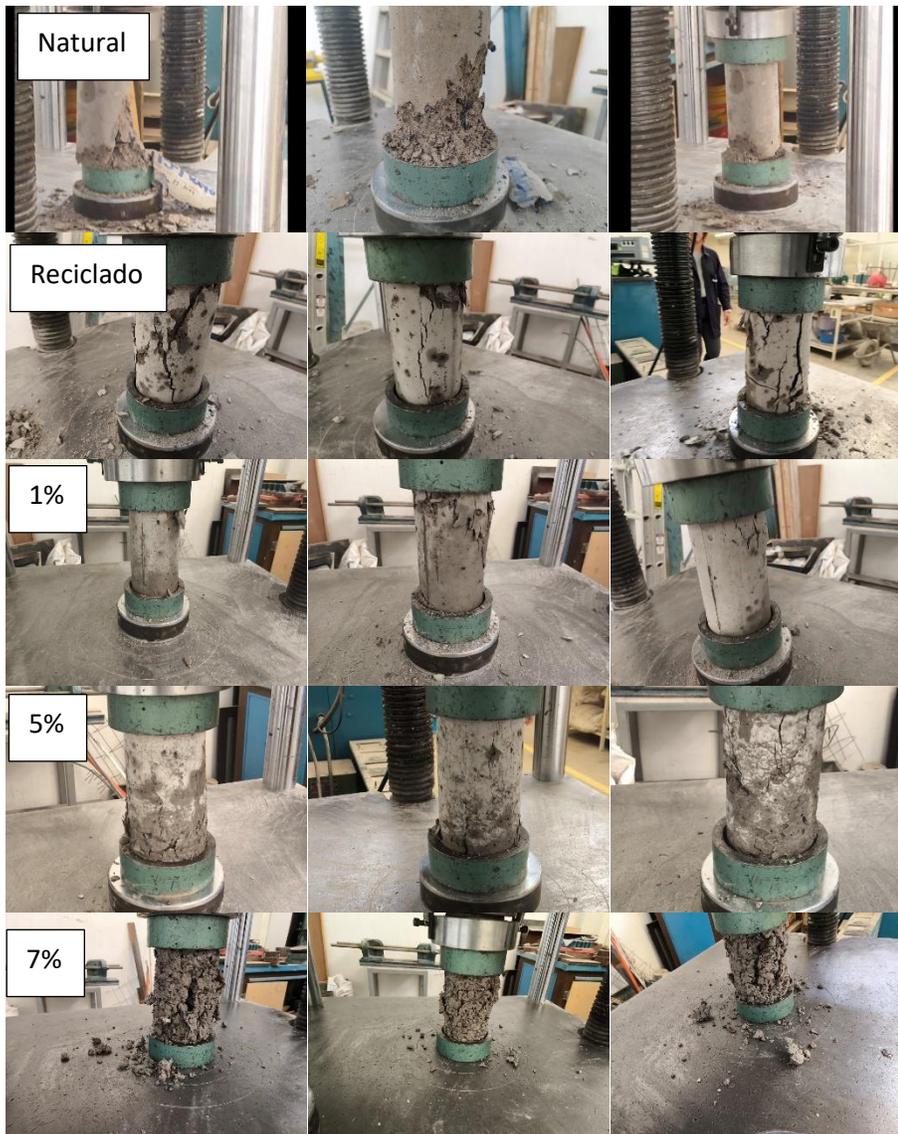


Figura 47: Cilindros ensayados a compresión, 14 días.

Fuente propia

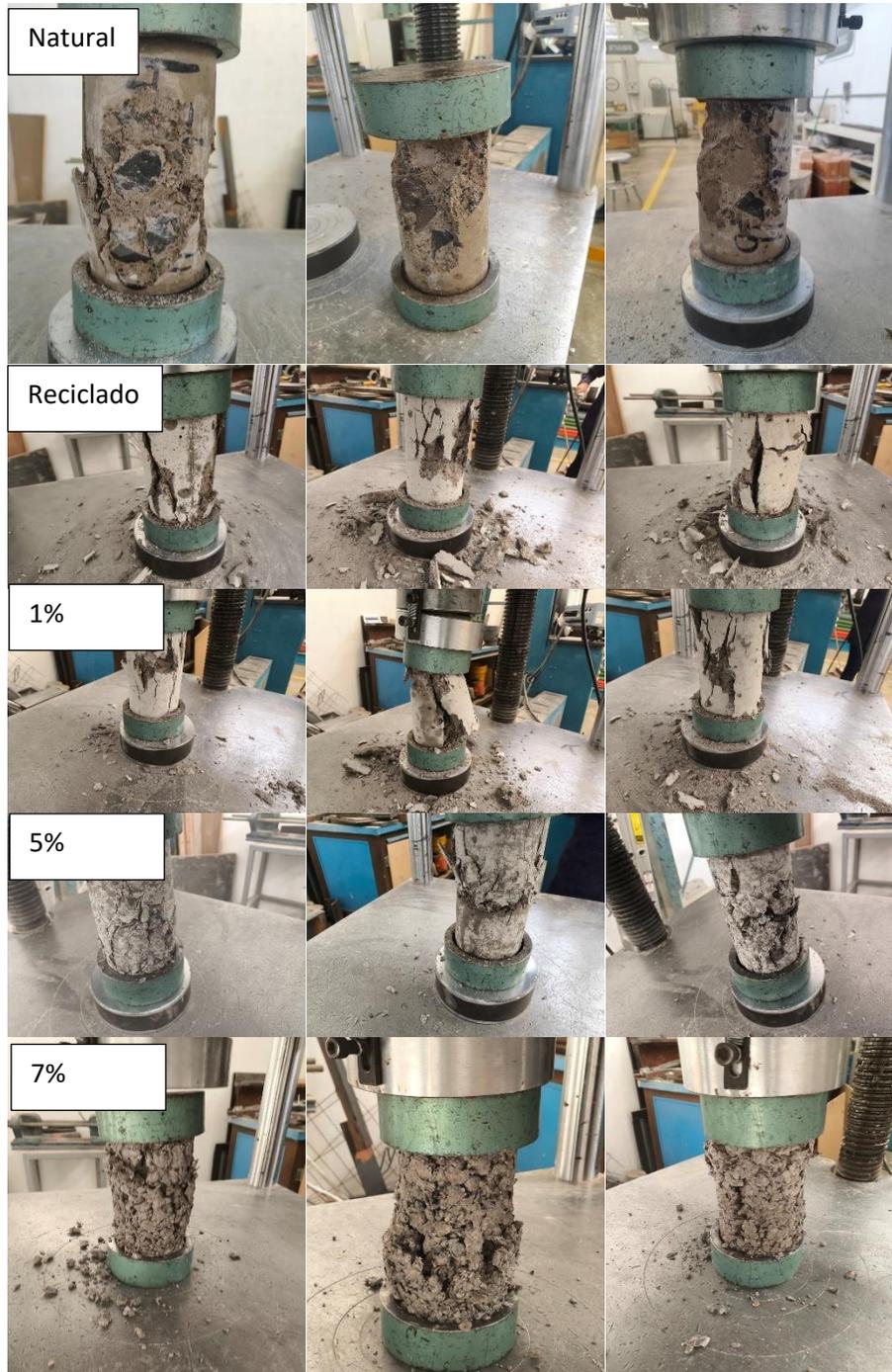


Figura 48: Cilindros ensayados a compresión, 28 días.

Fuente propia



Los resultados expresados en Kg/cm² se presentan en la tabla 21 tanto para los 14 días de curado como para los 28 días, además se presenta de manera gráfica los resultados de las tres pruebas de cada mezcla en la figura 49.

Tabla 21: Valores obtenidos de compresión a 14 y 28 días de las diferentes mezclas

COMPRESIÓN					
A 14 días					
# prueba	Tipo de mezcla (Kg/cm ²)				
	Natural	Reciclado	PET 1%	PET 5%	PET 7%
1	160.0806	184.5435	148.9345	126.8201	26.6675
2	152.3127	189.9926	153.4228	114.6419	41.2217
3	156.2466	192.2621	144.5448	86.7929	20.8640
PROMEDIO	156.2133	188.9327	148.9673	109.4183	29.5844
		120.95	4.64	46.45	81.06
A 28 días					
# prueba	Tipo de mezcla (Kg/cm ²)				
	Natural	Reciclado	PET 1%	PET 5%	PET 7%
1	300.9109	224.4916	191.2507	97.8935	52.2185
2	274.3771	213.3455	191.2507	93.5052	12.7495
3	299.9008	232.2595	183.4335	78.8212	25.4991
PROMEDIO	291.7296	223.3655	188.6449	90.0733	30.1557
		23.43	35.34	69.12	89.66

Elaboración propia

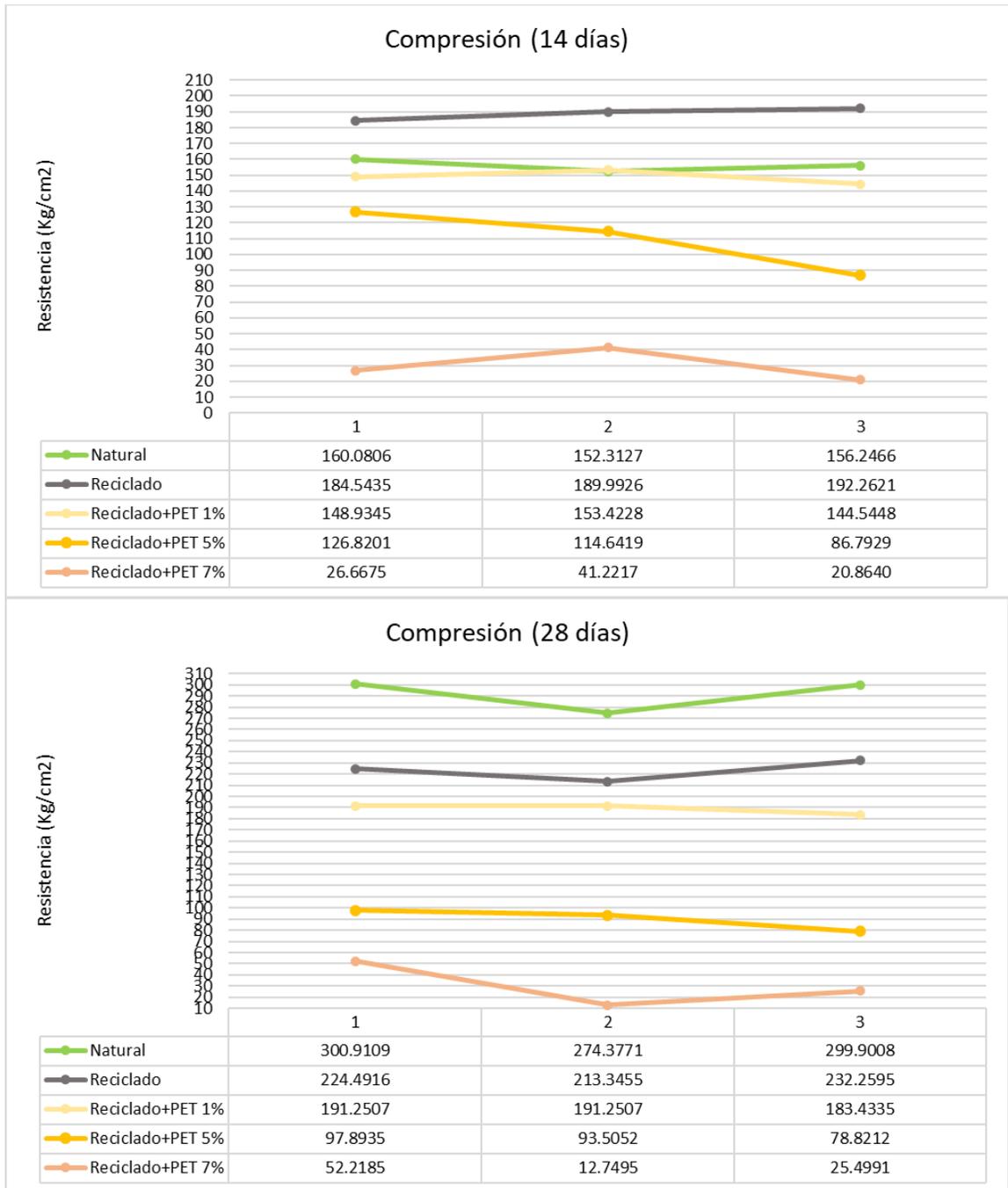


Figura 49: Interpretación gráfica de los resultados obtenidos de compresión simple.

Elaboración propia

3.3.8.2. Resistencia a la tensión diametral

La tensión diametral o prueba de tensión indirecta en especímenes cilíndricos de concreto, también conocida como compresión diametral o ensayo brasileño, es fundamental para evaluar la capacidad del concreto para resistir esfuerzos de tensión, una propiedad importante para predecir el comportamiento del concreto bajo cargas indirectas o en elementos estructurales sometidos a flexión y tracción.

La prueba consiste en aplicar una carga de compresión a lo largo de un diámetro del cilindro, generando una tensión en dirección perpendicular a la carga, y se utiliza principalmente para evaluar la resistencia a la fisuración del concreto, en la figura 50 se muestran todas las fisuras presentadas en el concreto a 14 días, mientras que en la figura 51 se presentan las fisuras a 28 días.



Figura 50: Cilindros ensayados a tensión, 14 días.
Fuente propia

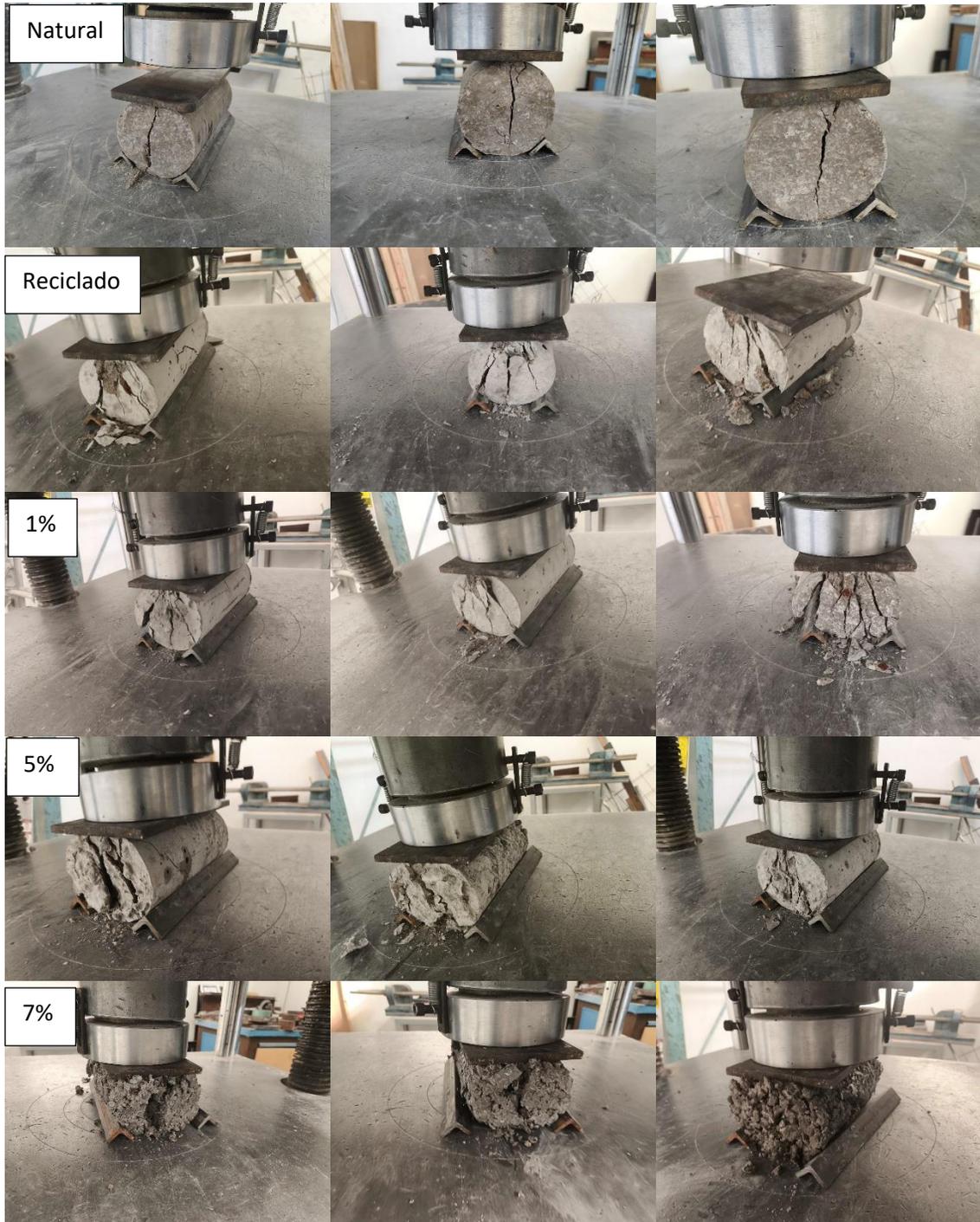


Figura 51: Cilindros ensayados a tensión, 28 días.

Fuente propia



Los resultados expresados en Kg/cm² se presentan en la tabla 22 tanto para los 14 días de curado como para los 28 días, además se presenta de manera gráfica los resultados de las tres pruebas de cada mezcla en la figura 52.

Tabla 22: Valores obtenidos de tensión a 14 y 28 días de las diferentes mezclas

TENSIÓN DIAMETRAL					
A 14 días					
# prueba	Tipo de mezcla (Kg/cm ²)				
	Natural	Reciclado	PET 1%	PET 5%	PET 7%
1	41.7281	141.6132	88.3119	55.6461	17.1379
2	53.3221	110.2925	67.2401	64.9161	16.2290
3	39.2093	127.1863	92.7392	91.5837	16.2290
PROMEDIO	44.7532	126.3640	82.7637	70.7153	16.5320
		282.36	184.93	158.01	63.06
A 28 días					
# prueba	Tipo de mezcla (Kg/cm ²)				
	Natural	Reciclado	PET 1%	PET 5%	PET 7%
1	76.5101	151.3026	129.0597	121.3412	25.4991
2	71.8751	141.4146	130.7333	96.8289	27.8230
3	84.0274	169.1558	132.4873	99.1529	28.9786
PROMEDIO	77.4709	153.9577	130.7601	105.7743	27.4336
		198.73	168.79	136.53	64.59

Elaboración propia

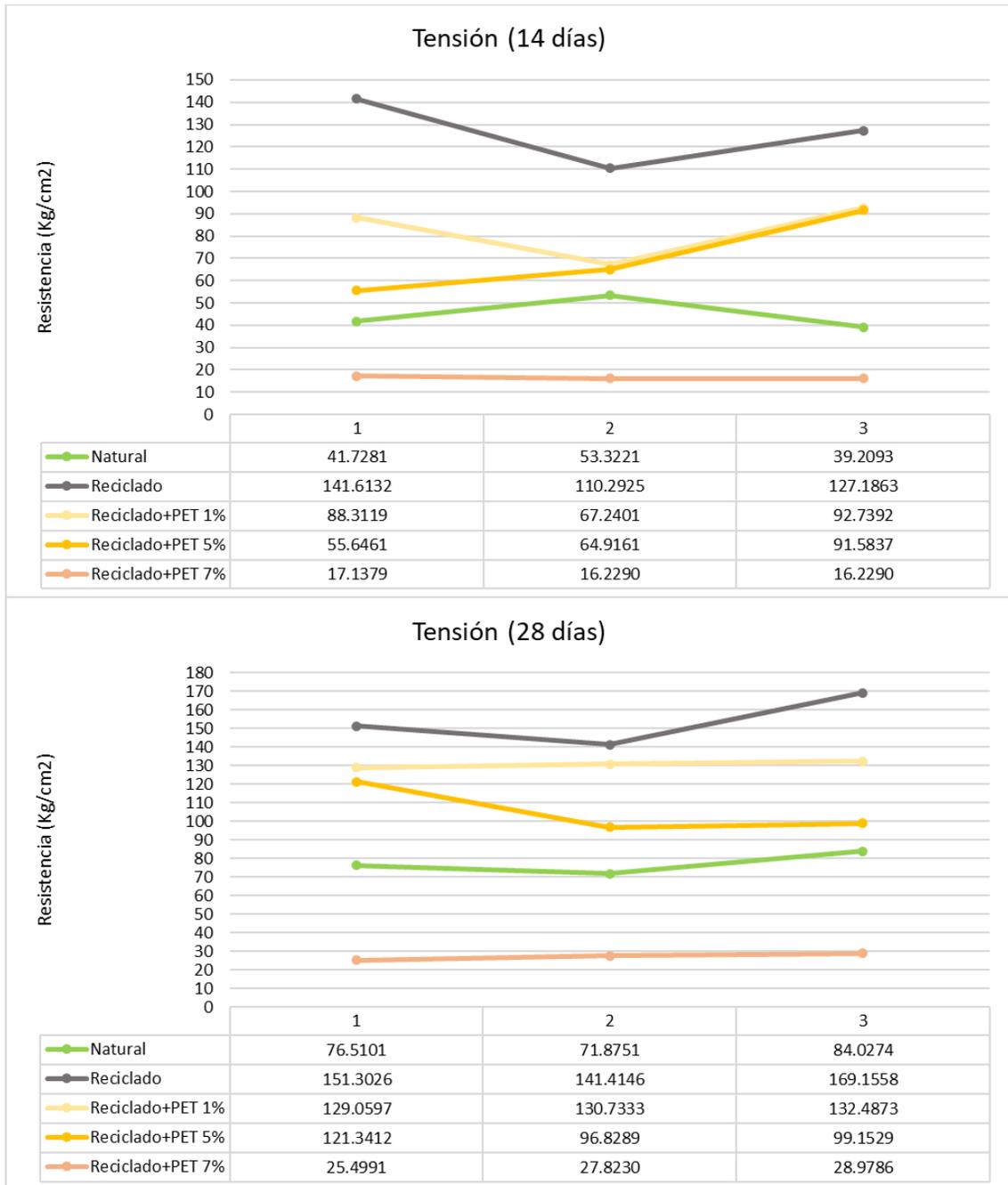


Figura 52: Interpretación gráfica de los resultados obtenidos de tensión diametral.

Elaboración propia

3.3.8.3. Absorción

Estándar utilizado para determinar la absorción de agua, la densidad y la porosidad de los agregados de concreto, cantidad de agua que un agregado puede absorber, lo cual es un indicador importante de su porosidad y su capacidad para influir en las propiedades del concreto, como la durabilidad y la resistencia.

La porosidad del agregado es importante porque afecta tanto a la durabilidad del concreto como a la resistencia al ataque de agentes externos como el agua y los ácidos.

Los pasos que se siguieron para este apartado consistieron en la elaboración de un cilindro extra de cada tipo de mezcla, dejando curarse a 28 días una vez curado se realizó a generar 4 pastillas de 5 centímetros por medio de tres cortes, estas pastillas se marcaron como se muestra en la figura 53 y se dejaron secar hasta que el porcentaje de variación del peso fuera menor al 5%, una vez logrado esto se procedió a sumergir por completo hasta que el mismo parámetro de variación mejor al 5% del peso del espécimen se cumpliera, una vez alcanzado esto se procedió a hervir las pastillas por un periodo de 5 horas una vez terminada esta fase y anotados los cambios en el peso se procedió a hacer el último análisis sumergiendo la pastilla en agua a fin de obtener la masa aparente inmersiva, este proceso se puede apreciar en la figura 54.



Figura 53: Máquina de corte, proceso del corte y marcado de las pastillas.
Fuente propia



Figura 54: Procesos de secado, saturado, hervido e inmersión de las pastillas.

Fuente propia

Las cuatro pastillas de las diferentes mezclas, así como un acercamiento de su superficie y las anotaciones de los cálculos de peso seco y peso saturado se pueden apreciar en la figura 55.



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO



FACULTAD
DE INGENIERÍA



DIPFI
POSGRADO
INGENIERÍA

La fase 3 implica la interpretación de todos los resultados y una breve discusión sobre su significado, así como la verificación de si estos valores cumplen con las normativas establecidas.

3.4. Fase III

La fase III de análisis e interpretación de resultados de mezcla al 0% contra diferentes porcentajes, conclusiones y recomendaciones se tratará más adelante en el apartado de resultados y discusión y conclusiones.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el análisis granulométrico, agregando los límites permitidos por la SCT para su uso en subbases y bases hidráulicas, se tiene la figura 56 en la cual se puede observar que los parámetros especificados en la normativa para uso en subbase y base hidráulica se ven cumplidos por lo que este parámetro podría ser usado incluso en capas inferiores de una carretera. Podemos concluir respecto a las granulometrías que el material pétreo natural fue solicitado con un tamaño nominal de 3/8", con mínimas variaciones en los tamaños de los agregados, ya que se destina para su uso posterior en pavimento. Sin embargo, no es apto como capa estructural, ya que comúnmente se utiliza para mejorar la superficie de rodamiento, sin aportar valores estructurales. En cuanto a la granulometría del agregado pétreo reciclado, se puede utilizar según la normativa como capa estructural Subbase y Base, aunque la curva no cumple con los parámetros establecidos para el tamaño solicitado de 3/8".

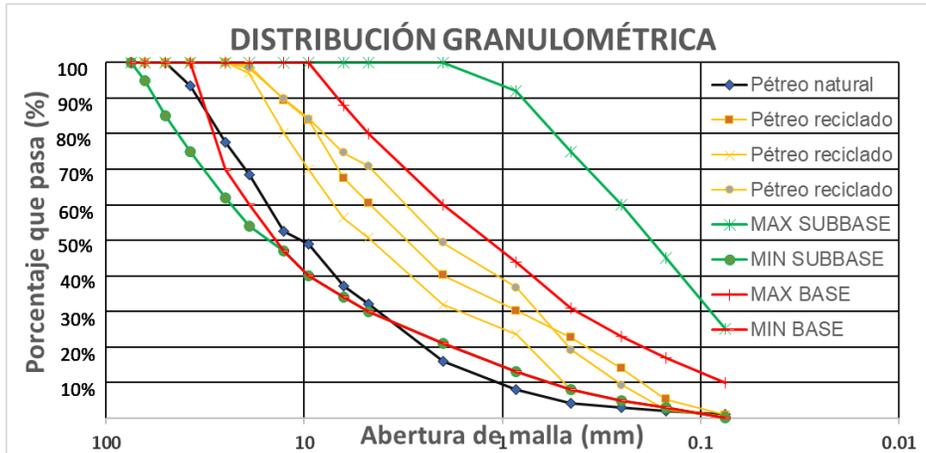


Figura 56: Granulometría de los diferentes pétreos con límites máximos y mínimos de subbase y base hidráulica.

Elaboración propia

Retomando la tabla 15 en agregados y la tabla 19 en concreto se tiene que en los agregados naturales la grava cuenta con un valor de peso unitario un poco bajo mientras que la arena está en valores esperados de una arena natural suelta, en los agregados reciclados la grava corresponde a los valores esperados de una arena artificias suelta de igual manera esto se presenta en la arena reciclada.

En la tabla 19 se puede observar en el peso unitario del concreto es mayor en agregados reciclado e incluso en agregados reciclados con PET al 1% pero tiene una tendencia a disminuir a la par que la adición de mayor cantidad de PET.

Los valores de densidad se ven explicados brevemente en el apartado de metodología, en cuanto a la absorción comparando los valores obtenidos en la figura 25 y la figura 26 se tiene que los agregados reciclados rebasan por mucho los valores más altos de absorción presentados en cualquier tipo de roca ígnea, metamórfica y sedimentaria común de acuerdo con la figura 57 mientras que el agregado natural presenta un comportamiento similar al de una felsita o una piedra caliza.



Tipo de roca	Absorción (%)	Tipo de roca	Absorción (%)	Tipo de roca	Absorción (%)
IGNEAS		METAMÓRFICAS		SEDIMENTARIAS	
Granito	0.3	Anfibolita	0.4	Piedra caliza	0.9
Sienita	0.4	Pizarra	0.5	Dolomita	1.1
Felsita	0.8	Cuarzita	0.3	Arenisca	1.8
Basalto	0.5	Mármol	0.2	Chert	1.6
		Serpentina	0.9	Conglomerado	1.2

Figura 57: Valores medios de absorción de los principales tipos de rocas.

Recuperada de Waddell J. Dobrowolski J., Manual de la Construcción con Concreto, p.29.

En el desgaste de los ángeles se tiene que el agregado reciclado presenta mayor desgaste que el agregado natural a su vez, de acuerdo con normativa vigente el agregado reciclado podría ser ocupado en subbases y en carpetas de concreto, quedando encima del límite máximo para bases, el agregado natural cumpliría con las normativas en esta prueba. Se observa una diferencia significativa, con el material natural presentando un desgaste del 21.9% frente al 37.41% del agregado reciclado, indicando un desgaste elevado que no cumple con la normativo de uso como subbase. Esto puede deberse al tamaño de las partículas y la ausencia de agua, siendo el agregado natural la opción más recomendada.

En el intemperismo acelerado el material reciclado mostró un desgaste considerablemente menor (1.19%), gracias a su origen en el triturado y segregado de concretos que proporciona resistencia inherente a los elementos climáticos. En contraste, el agregado natural obtuvo un mayor porcentaje de desgaste (12.5%) al carecer de aditivos o químicos que contribuyan a su resistencia al intemperismo, para uso en carpeta de concreto hidráulico el material reciclado presenta una resistencia extraordinaria teniendo 11.31% menos que el material natural quedando dentro del parámetro estipulado por la SCT, de $\leq 12\%$.

En el desgaste micro-deval se observa que la brecha entre el material reciclado y el material natural disminuye esto debido a la presencia de agua y pesos menores en la misma, teniendo una diferencia de solo 5.01% entre ellos. Este incremento se atribuye a la presencia de agua en la prueba, la cual ayuda a minimizar el impacto de las bolas metálicas. Por lo tanto, en

esta prueba, ambos agregados pueden ser utilizados ya que su desgaste es comparable y cumple con la normativa.

Los límites de Atterberg no pudieron ser evaluados por medio del método de la copa de casa grande a pesar de ello se evaluó por medio del cono inglés, a pesar de la variación de resultados entre agregados naturales y reciclados ambos finos presentaron una clasificación ML que indica que son limos de baja compresibilidad; mezcla de limo de baja plasticidad, arena y grava; polvo de roca.

En las pruebas efectuadas en el concreto fresco se tiene que el revenimiento cuando fue adicionado el PET tendía a un decrecimiento, mientras que en el agregado natural y reciclado no se notó un patrón específico.

Para una mejor interpretación se tomaron valores promedio de compresión y tensión para las diferentes mezclas, mostrado en la figura 58 para compresión y la figura 59 para tensión.

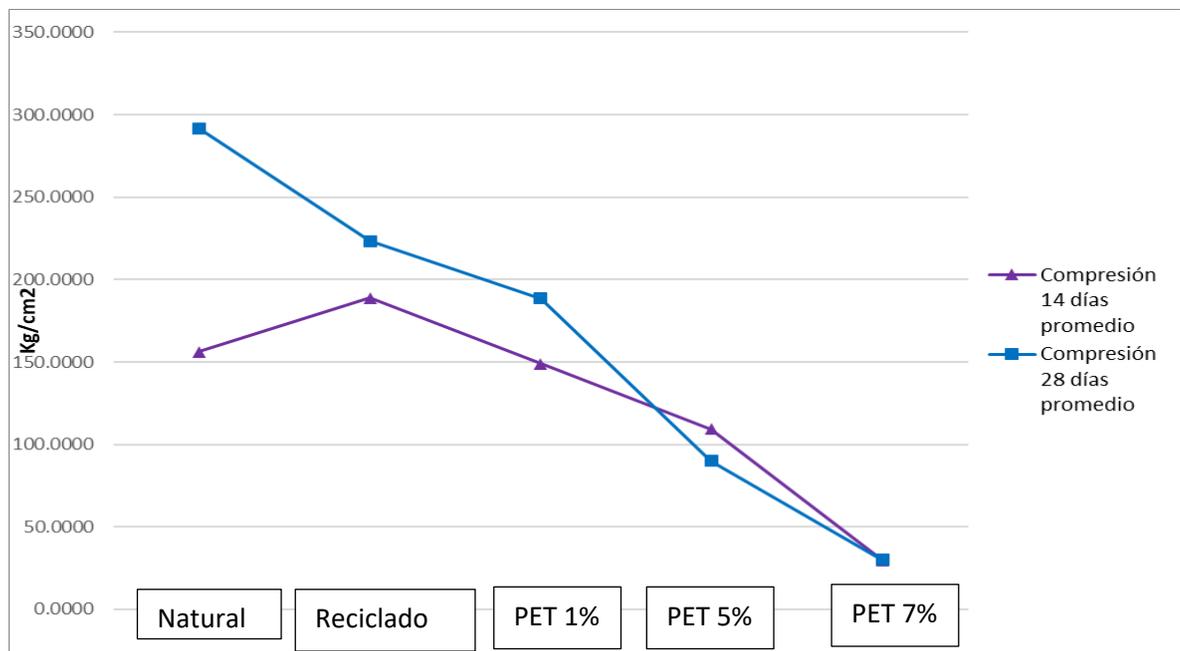


Figura 58: Gráfica de valores de compresión promedios a 14 y 28 días.

Elaboración propia

Como se observa en la gráfica se tiene que el material natural tiende a tener un desempeño menor en 32.72 kg/cm² en comparación con agregados reciclado en periodos cortos de tiempo en este caso en la evaluación a 14 días mientras que al terminar el ciclo de curado la mezcla que obtiene el mejor resultado de resistencia es la mezcla convencional o natural teniendo una resistencia mayor por 68.36 kg/cm² en relación con la mezcla de reciclado que es la segunda con mayor resistencia a la compresión.

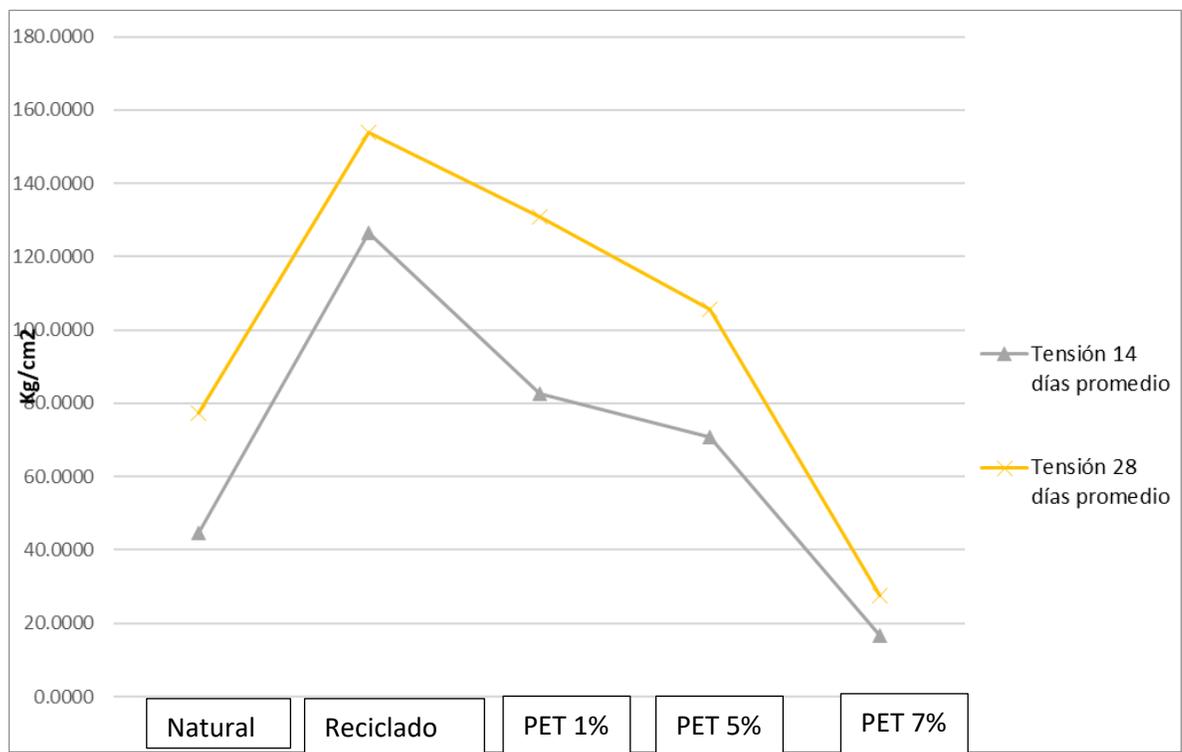


Figura 59: Gráfica de valores de tensión promedios a 14 y 28 días.

Elaboración propia

Como se observa en la gráfica la línea de tendencia de resistencias suele coincidir tanto a los 14 días de curado como a los 28 días por lo que se tomaran solo los resultados a 28 días en estos la mezcla con mejores desempeños de resistencia fue la mezcla que contenía agregado

reciclado teniendo una mejoría de 76.49 kg/cm² en comparación con una mezcla convencional y teniéndose mejores resultados también en mezclas con contenido de PET al 1% con 53.29 kg/cm² en relación con la mezcla convencional y en mezclas con contenido de PET al 5% se tiene un aumento de 28.3 kg/cm² en relación con una mezcla convencional teniéndose solo un decrecimiento en mezclas con PET al 7% con una disminución de 50.04 kg/cm² en relación con una mezcla convencional esto nos indica que los límites máximos permitidos para un mejoramiento de las mezclas con PET se encuentran entre el 5% y el 7% presentándose a partir de ello un deceso de su desempeño.

Los valores de absorción tienen la tendencia de aumentar cuando se tiene presencia de material reciclado aunque en las mezclas con contenido de PET este valor puede ser aparente debido a la presencia de grandes variaciones visibles que influyen el valor arrojado.

En esta última figura 60 se presentan los valores de diferentes pruebas empalmados a fin de observar patrones de comportamiento y relaciones entre resultados.

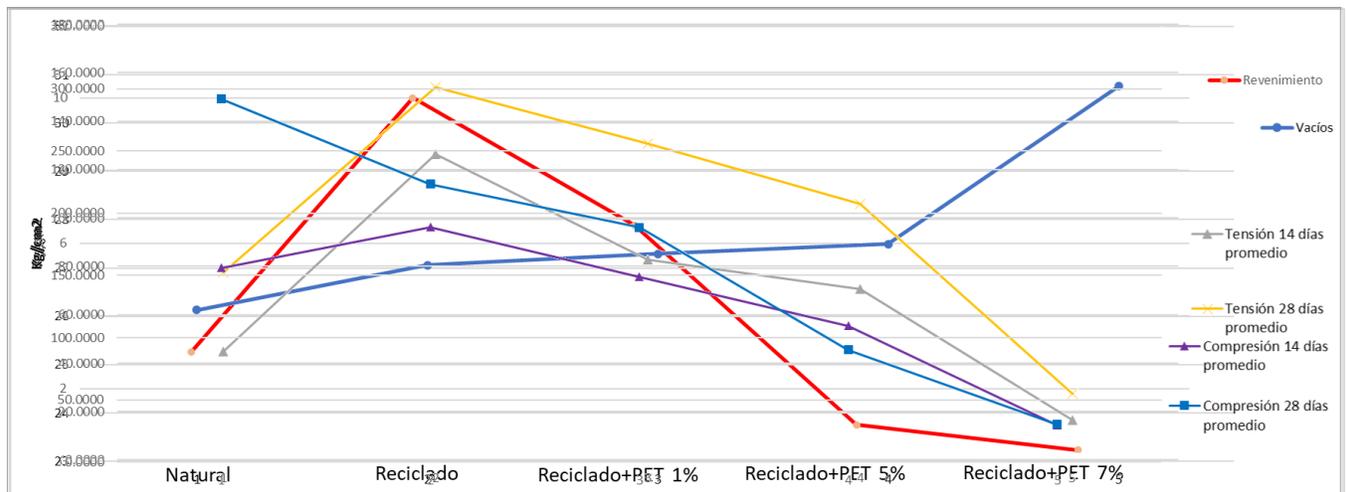


Figura 60: Empalme de resultados de distintas pruebas.

Elaboración propia

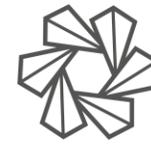
Considerando las características reveladas en las pruebas, se recomienda el uso de materiales de banco naturales o su combinación con un porcentaje menor de agregados reciclados, ya que estos últimos tienden a mostrar características inferiores según las normativas. Además,



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO



FACULTAD
DE INGENIERÍA



DIPFI
POSGRADO
INGENIERÍA

los pétreos reciclados presentan variabilidad en función del concreto obtenido, pudiendo ser resistente o pobre. La cantidad de finos en los pétreos reciclados es elevada, sugiriendo un método más efectivo de separación y cribado para garantizar un suministro constante conforme a los tamaños requeridos.

En cuanto a las pruebas enfocadas a los finos tenemos que en la prueba de penetración de cono inglés se logró identificar su comportamiento como un limo por lo que las pruebas de límites fueron imposibles de hacer.

8. CONCLUSIONES

En conclusión, no se recomienda el reemplazo total de los agregados naturales por agregados pétreos reciclados, ya que, si bien estos materiales han demostrado una resistencia destacada al intemperismo con un rendimiento 11.31% superior en comparación con los agregados naturales, sus características técnicas son, en general, inferiores. Aunque los agregados reciclados no se consideran intrínsecamente de baja calidad, su desempeño no cumple con las normativas vigentes, limitando su aplicación en obras estructurales. Esto subraya la necesidad de desarrollar pruebas de desempeño en campo para evaluar con mayor precisión sus propiedades y determinar aplicaciones adecuadas. Asimismo, la considerable variabilidad en la granulometría observada al recolectar tres muestras de diferentes partes de un banco de reciclados evidencia la necesidad de un análisis más minucioso de sus características, lo cual sugiere su uso más realista en aplicaciones como terracerías, subrasantes, subbases y bases.

Otro aspecto relevante en la construcción es el análisis de costos. En el caso del uso de PET reciclado en el concreto, el costo estimado varía entre \$58.19 pesos/m³ para una adición del 1% de PET hasta \$407.35 pesos/m³ para una adición del 7% de PET en la mezcla de concreto, sin considerar el costo asociado al proceso de preparación de las botellas. Esto hace evidente la necesidad de realizar un estudio económico más detallado sobre la viabilidad de utilizar PET en el sector de la construcción. A pesar de que el costo del concreto con PET tiende a ser mayor, el impacto ambiental de su empleo es relativamente menor.



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO



FACULTAD
DE INGENIERÍA



DIPFI
POSGRADO
INGENIERÍA

Los agregados pétreos reciclados presentan una resistencia intrínseca a la acción de sales e intemperismo, y los finos derivados de estos agregados tienen un comportamiento similar al limo, mostrando buena trabajabilidad pero con baja cohesión. Se sugiere que el aprovechamiento de estos residuos de construcción se realice mediante una mezcla que no supere el 50% de agregados reciclados combinados con agregados naturales, con el objetivo de conservar las propiedades esenciales de los pavimentos rígidos y flexibles sin sacrificar calidad estructural. Por otro lado, se recomienda utilizar PET junto con agregados reciclados en porcentajes menores al 7%, ya que en ensayos de compresión, el uso de un 1% de PET combinado con agregados reciclados casi alcanzó la resistencia esperada; además, en las pruebas de tensión diametral, esta adición mejoró el rendimiento de la mayoría de las mezclas, excepto en aquellas con un 7% de PET, en las cuales se observó un comportamiento deficiente. Todo lo anterior se basa en una relación con el peso de las mezclas.

En resumen, los resultados de las pruebas de compresión simple y tensión diametral mostraron una reducción de hasta 23.43% en la resistencia a la compresión simple en las mezclas compuestas exclusivamente de agregados reciclados. Sin embargo, en cuanto a la tensión diametral, se obtuvieron incrementos significativos de hasta 98% en las mezclas con agregados reciclados únicamente, un 68.79% en las mezclas con un 1% de PET y un 36.53% en las mezclas con un 5% de PET.

REFERENCIAS

AASHTO. (1993). AASHTO guide for design of pavement structures. Obtenido de <https://habib00ugm.files.wordpress.com/2010/05/aashto1993.pdf>

Acevedo Jaramillo, A. B., & Posada Franco, J. E. (Enero-Junio de 2019). Polietileno tereftalato como reemplazo parcial del agregado fino en mezclas de concreto. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, XVIII(34), 45-56. doi:10.22395/rium.v18n34a3



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO



FACULTAD
DE INGENIERÍA



DIPFI
POSGRADO
INGENIERÍA

Aguilera Bazán, G., & Diestra Lujan, V. A. (2017). Influencia de la fibra de PET a partir de botellas recicladas sobre el comportamiento mecánico en un concreto aplicado en prefabricados. Perú.

Alesmar, L., Rendón, N., & Korody, M. E. (Febrero de 2008). Diseños de mezcla de tereftalato de polietileno (PET)-Cemento. Revista de la Facultad de Ingeniería de la U.C.V., XXIII(1), 77-86.

Aquino Castro, Y. J. (2019). Estudio comparativo de la influencia del plástico (PET) en la resistencia a la compresión y durabilidad del concreto reciclado y concreto convencional. Perú.

ASTM. (1978). ASTM C78-02: Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading) .

Braverman-Bronstein, A., Camacho-García-Formentí, D., Zepeda-Tello, R., Cudhea, F., M. Singh, G., Mozaffarian, D., & Barrientos-Gutierrez, T. (10 de Diciembre de 2019). Mortality attributable to sugar sweetened beverages consumption in Mexico: an update. International Journal of Obesity(44), 1341-1349. doi:10.1038/s41366-019-0506-x

Caballero Meza, B., & Florez Lengua, O. (2016). Elaboración de bloques en cemento reutilizando el plástico polietileno-tereftalato (PET) como alternativa sostenible para la construcción. Colombia.

Cárdenas Fierro, E. J., & Lozano Cortes, J. L. (2016). Correlación entre el módulo de rotura y la resistencia a la compresión del concreto hidráulico con materiales procedentes del río Coello para el control de pavimentos rígidos. Colombia.

Carrillo, J., & Alcocer, S. (Octubre-Diciembre de 2012). Revisión de criterios de sostenibilidad en muros de concreto para viviendas sismorresistentes. Ingeniería Investigación y Tecnología, XIII(4), 479-487. doi:1405-7743 FI-UNAM



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO



FACULTAD
DE INGENIERÍA



DIPFI
POSGRADO
INGENIERÍA

Cobos-Sáenz de Viteri, L. A., & Wladimir Valle-Benítez, A. (Septiembre de 2021). Estudio comparativo sobre el comportamiento mecánico del concreto con fibra de polietileno tereftalato (PET) reciclado y concreto con fibra de acero. *Dominio de las ciencias*, VII(5), 798-818. doi:2477-8818

CONACYT. (2023). CONACYT. Obtenido de Programas Nacionales Estratégicos: <https://conacyt.mx/pronaces/>

Esquivel Delgado, P. J., & Ticliahuanca Mendoza, M. G. (Mayo de 2019). Resistencia y agrietamiento por contracción del concreto para pavimentos rígidos con incorporación de fibras PET. Perú.

Foti, D. (21 de Diciembre de 2010). Preliminary analysis of concrete reinforced with waste bottles PET fibers. *Construction and Building Materials*(25), 1906-1915. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.11.066

García Rojas, J. M., & Vigo Rojas, R. A. (2019). Revisión sistemática sobre la utilización de plástico reciclado (PET) en la elaboración de ladrillo de concreto armado. Perú.

Gonzales Armas, R. K. (2016). Propiedades físicas y mecánicas de ladrillos de concreto con la incorporación de PET en diferentes porcentajes. Perú.

Gravina, R. J., Xie, T., Bennett, B., & Visintin, P. (2021). HDPE and PET as aggregate replacement in concrete: life-cycle assessment, material development and a case study. *Journal of Building Engineering*(44), 1-14. doi:10.1016/j.job.2021.103329

INAES. (21 de Julio de 2020). GOB. Obtenido de Cooperativas de reciclaje: <https://www.gob.mx/inaes/articulos/cooperativas-de-reciclaje?idiom=es>

INECC; SEMARNAT. (2012). GOB. Obtenido de Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos 2012: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/187440/diagnostico_basico_extenso_2012.pdf



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO



FACULTAD
DE INGENIERÍA



DIPFI
POSGRADO
INGENIERÍA

INEGI. (2020). INEGI. Obtenido de En México somos 126 014 024 habitantes: Censo de población y vivienda 2020: https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2021/EstSociodemo/ResultCenso2020_Nal.pdf

Khajuria, A., & Sharma, P. (Noviembre de 2019). Use of plastic aggregates in concrete. *International journal of innovative technology and exploring engineering (IJITEE)*, IX(1), 4406-4412. doi:2278-3075

López Muro, J. D. (Noviembre de 2019). Mejoramiento de las propiedades mecánicas del concreto hidráulico mediante la aplicación de homopolímeros reciclados para su aplicación como pavimento rígido. Querétaro, Querétaro.

Lugo Mejía, J. E., & Torres Pérez, Y. S. (2019). Caracterización del comportamiento mecánico del concreto simple con adición de fibras poliméricas recicladas PET. Colombia.

Martínez-Barrera, G., & Gencel, O. (2015). Waste materials cured and modified by irradiating and their use in concrete. *The Royal Society of Chemistry*.

Mendoza Gómez, J. M. (30 de Abril de 2021). Estudio de la variación en el módulo de ruptura del pavimento rígido con inclusión de poliestireno expandido y puzolanas naturales. Querétaro, México.

Mendoza, C. J., Aire, C., & Dávila, P. (Enero-Junio de 2011). Influencia de las fibras de polipropileno en las propiedades del concreto en estados plástico y endurecido. *Concreto y cemento. Investigación y desarrollo*, II(2), 35-47. doi: 2007-3011

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2013). Manual de carreteras. Suelos, geología, geotecnia y pavimentos. Sección suelos y pavimentos. Perú.

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2014). Manual de carreteras. Suelos geología, geotecnia y pavimentos. Sección suelos y pavimentos. Perú.



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO



FACULTAD
DE INGENIERÍA



DIPFI
POSGRADO
INGENIERÍA

Miranda Reséndiz, A. (Julio de 2020). Geomalla de PET como refuerzo estructural en pavimentos rígidos. Querétaro, México.

OCDE. (22 de Febrero de 2022). OCDE. Obtenido de La contaminación por plástico crece sin cesar, en tanto que la gestión de residuos y el reciclaje se quedan cortos, dice la OCDE: <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:20mdt6TclAAJ:https://www.oecd.org/centrodemexico/medios/perspectivas-globales-del-plastico.htm&cd=1&hl=es-419&ct=clnk&gl=mx&client=opera>

Pacheco-Vega, R. (Mayo-Agosto de 2015). Agua embotellada en México: de la privatización del suministro a la mercantilización de los recursos hídricos. *Espiral, Estudios sobre estado y sociedad*, XXII(63), 221-263.

Pacheco-Vega, R. (2017). Agua embotellada en México: realidades, retos y perspectivas. En C. A. López, L. Zambrano, R. Ruiz Ortega, M. A. Guzmán, R. Pérez Espejo, R. Sandoval, . . . A. Caldera, *El agua en México. Actores, sectores y paradigmas para una transformación social-ecológica* (Primera ed., págs. 193-214). Ciudad de México, México: Fundación Friedrich-Ebert Stiftung (FES). doi:978-607-7833-86-4

Rahmani, E., Dehestani, M., Beygi, M. H., Allahyari, H., & Kikbin, I. M. (12 de Julio de 2013). On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles. *Construction and Building Materials*(47), 1302-1308. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.06.041

REAL ACADEMIA ESPAÑOLA. (2023). *Diccionario de la lengua española* (Vigesimotercera ed.). Barcelona, España: Espasa Libros, S.L.U. doi:978-84-670-4788-2

Reyes Montoya, I. M. (2018). *Diseño de un concreto con fibras de polietileno tereftalato (PET) reciclado para la ejecución de losas en el asentamiento humano Amauta-Ate-Lima Este* (2018). Lima, Perú.



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO



FACULTAD
DE INGENIERÍA



DIPFI
POSGRADO
INGENIERÍA

Santiago Miguel, A., Santamaría-Cuellar, M. d., Contreras-Santos, G., Guerrero-García, V. M., & Hernández-Alcántara, A. M. (Julio-Diciembre de 2015). Diseño y elaboración de adoquines de PET reciclado. *Ideas en Ciencia*, XXIV(44), 7-18. doi:2007-5197

Santos Cortés, L. d. (Septiembre de 2006). Contribución de fibras PP provenientes de plásticos reciclados en el agrietamiento y resistencia del concreto en pavimentos portuarios de Veracruz. Veracruz, México.

Silva Herrera, R., & Ochoa Gonzalez, G. H. (Julio-Diciembre de 2019). Integración de PET reciclado a flexión en un elemento constructivo de concreto. *Vivienda y comunidades sustentables*, III(6), 99-117. doi:10.32870/rvcs.v0i6.106

Vilakazi, S., Onyari, E., Nkwonta, O., & Bwapwa, J. K. (1 de Noviembre de 2022). Reuse of domestic sewage sludge to achieve a zero waste strategy & improve concrete strength & durability - A review. *South African Journal of Chemical Engineering*(43), 122-127. doi:10.1016/j.sajce.2022.10.012



9. APÉNDICE

DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA PARA MATERIALES PÉTREOS					
Arena					
MATERIAL RETENIDO EN MALLA NO. 4					
MALLA	mm	RETENIDO PARCIAL (g)	RETENIDO PARCIAL (%)	RETENIDO ACUM (%)	% QUE PASA
3"	75	0.00	0.00%	0.00%	100.00%
2 1/2"	63.5	0.00	0.00%	0.00%	100.00%
2"	50	0.00	0.00%	0.00%	100.00%
1 1/2"	37.5	0.00	0.00%	0.00%	100.00%
1"	25	0.00	0.00%	0.00%	100.00%
3/4"	19	25.60	0.98%	0.98%	99.02%
1/2"	12.7	252.30	9.62%	10.59%	89.41%
3/8"	9.5	147.70	5.63%	16.22%	83.78%
1/4"	6.35	427.30	16.29%	32.51%	67.49%
No. 4	4.75	183.00	6.98%	39.48%	60.52%
PASA NO. 4		1587.70	60.52%		
SUMA		2623.60			
MATERIAL TAMIZADO POR MALLA NO. 4					
MALLA	mm	RETENIDO PARCIAL (g)	RETENIDO PARCIAL (%)	RETENIDO ACUM (%)	% QUE PASA
10	2	533.1	20.32%	59.80%	40.20%
20	0.85	261.7	9.97%	69.78%	30.22%
40	0.425	200.4	7.64%	77.42%	22.58%
60	0.25	226.5	8.63%	86.05%	13.95%
100	0.15	226	8.61%	94.66%	5.34%
200	0.075	118.6	4.52%	99.18%	0.82%
PASA 200		21.4	0.82%	100.00%	
SUMA		1587.7	-	-	-
GRAVA		39.48%		ARENA 59.70%	
				FINOS 0.82%	
D ₁₀ = 0.20414159	Cu = 22.92602	Grava = 39.48	Clasificación SUCS (ASTM D 2487)		
D ₃₀ = 0.83765719		Arena = 59.70	Arena mal graduada con grava (SP)		
D ₆₀ = 4.68015382	Cc = 0.734414	Finos = 0.82			



DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA PARA MATERIALES PÉTREOS					
Arena					
MATERIAL RETENIDO EN MALLA NO. 4					
MALLA	mm	RETENIDO PARCIAL (g)	RETENIDO PARCIAL (%)	RETENIDO ACUM (%)	% QUE PASA
3"	75	0.00	0.00%	0.00%	100.00%
2 1/2"	63.5	0.00	0.00%	0.00%	100.00%
2"	50	0.00	0.00%	0.00%	100.00%
1 1/2"	37.5	0.00	0.00%	0.00%	100.00%
1"	25	0.00	0.00%	0.00%	100.00%
3/4"	19	139.00	2.97%	2.97%	97.03%
1/2"	12.7	792.30	16.91%	19.88%	80.12%
3/8"	9.5	484.00	10.33%	30.21%	69.79%
1/4"	6.35	632.90	13.51%	43.72%	56.28%
No. 4	4.75	258.20	5.51%	49.23%	50.77%
PASA NO. 4		2378.60	50.77%		
SUMA		4685.00			
MATERIAL TAMIZADO POR MALLA NO. 4					
MALLA	mm	RETENIDO PARCIAL (g)	RETENIDO PARCIAL (%)	RETENIDO ACUM (%)	% QUE PASA
10	2	881.8	18.82%	68.05%	31.95%
20	0.85	390.3	8.33%	76.38%	23.62%
40	0.425	741.5	15.83%	92.21%	7.79%
60	0.25	139.4	2.98%	95.18%	4.82%
100	0.15	94.7	2.02%	97.21%	2.79%
200	0.075	106.6	2.28%	99.48%	0.52%
PASA 200		24.3	0.52%	100.00%	
SUMA		2378.6	-	-	-
GRAVA		49.23%		ARENA 50.25%	
				FINOS 0.52%	
D ₁₀ =	0.48432232	Cu =	14.90125	Grava =	49.23
D ₃₀ =	1.730988983			Arena =	50.25
D ₆₀ =	7.217009006	Cc =	0.857229	Finos =	0.52
Clasificación SUCS (ASTM D 2487)					
Arena mal graduada con grava (SP)					



PRUEBA MÚLTIPUNTO CONO INGLÉS MATERIAL RECICLADO

LÍMITE LÍQUIDO

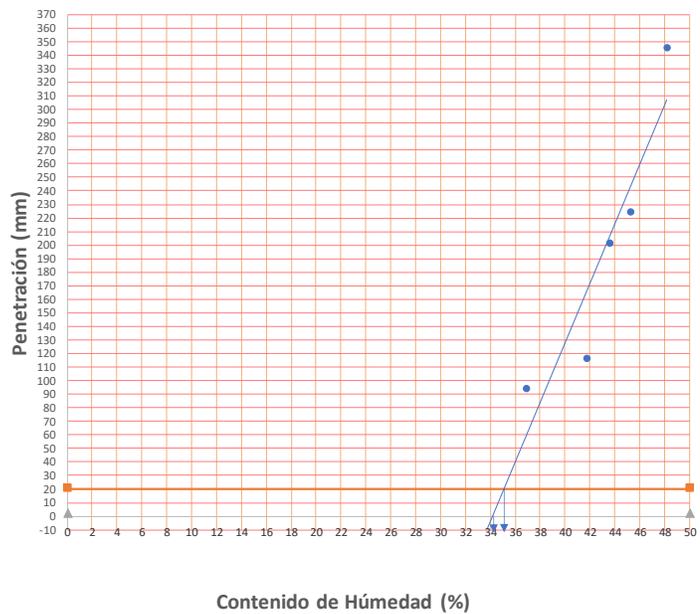
PROCEDIMIENTO: MULTIPUNTO "A"

CÁPSULA No.	MASA CÁPSULA + MASA SUELO HÚMEDO[g] (Mc+Msh)	MASA CÁPSULA + MASA SUELO SECO[g] (Mc+Mss)	MASA DE LA CÁPSULA[g] (Mc)	MASA DEL SUELO SECO[g] Mss=(Mc+Mss)-Mc	MASA DEL AGUA [g] Ma=(Mc+Msh)-(Mc+Mss)	CONTENIDO DE HUMEDAD[%] W=(Ma/Mss)*100	PENETRACIÓN DEL CONO (mm)
a)	145.10	138.50	120.60	17.90	6.60	36.9	94.00
b)	151.10	141.80	119.50	22.30	9.30	41.7	116.50
1	171.70	160.10	133.50	26.60	11.60	43.6	201.00
2	147.40	140.30	124.60	15.70	7.10	45.2	224.50
3	149.30	140.20	121.30	18.90	9.10	48.1	345.00

CONTENIDO DE HUMEDAD[%] W=(Ma/Mss)*100	PENETRACIÓN DEL CONO (mm)
36.9	94.00
41.7	116.50
43.6	201.00
45.2	224.50
48.1	345.00
0.0	20.00
50.0	20.00
0.0	2.20
50.0	2.20

RESULTADOS	
LÍMITE LÍQUIDO [%]	35
LÍMITE PLÁSTICO [%]	34.4
ÍNDICE PLÁSTICO [%]	10.95
Clasificado como un limo inorganico de mediana compresibilidad y limos organicos	

GRÁFICA MULTIPUNTO CONO INGLÉS



NORMAS DE REFERENCIA

NMX-C-493-ONNCE-2014



PRUEBA MÚLTIPUNTO CONO INGLÉS MATERIAL NATURAL

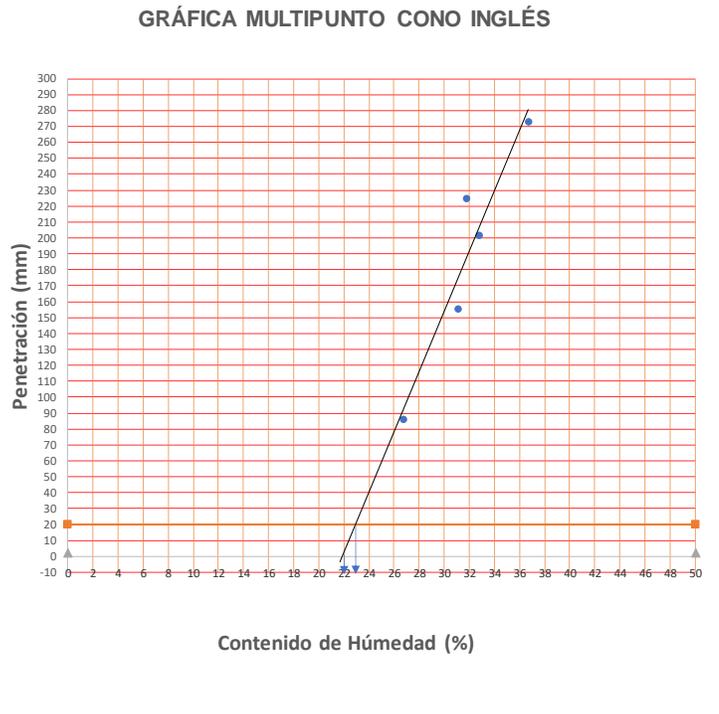
LÍMITE LÍQUIDO

PROCEDIMIENTO: MULTIPUNTO "A"

CÁPSULA No.	MASA CÁPSULA + MASA SUELO HÚMEDO[g] (Mc+Msh)	MASA CÁPSULA + MASA SUELO SECO[g] (Mc+Mss)	MASA DE LA CÁPSULA[g] (Mc)	MASA DEL SUELO SECO[g] Mss=(Mc+Mss)-Mc	MASA DEL AGUA [g] Ma=(Mc+Msh)-(Mc+Mss)	CONTENIDO DE HUMEDAD[%] W= (Ma/Mss)*100	PENETRACIÓN DEL CONO (mm)
a)	148.60	143.50	124.40	19.10	5.10	26.7	86.00
b)	148.40	141.50	119.30	22.20	6.90	31.1	155.00
1	155.50	148.10	125.50	22.60	7.40	32.7	201.50
2	147.40	141.90	124.60	17.30	5.50	31.8	224.50
3	162.20	152.30	125.30	27.00	9.90	36.7	273.00

CONTENIDO DE HUMEDAD[%] W= (Ma/Mss)*100	PENETRACIÓN DEL CONO (mm)
26.7	86.00
31.1	155.00
32.7	201.50
31.8	224.50
36.7	273.00
0.0	20.00
50.0	20.00
0.0	2.20
50.0	2.20

RESULTADOS	
LÍMITE LÍQUIDO [%]	23
LÍMITE PLÁSTICO [%]	22
ÍNDICE PLÁSTICO [%]	2.19
Clasificado como un limo inorganico de baja compresibilidad	



NORMAS DE REFERENCIA

NMX-C-493-ONNCCE-2014
Pag. 1 de 1