



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

**DESARROLLO DE CONCRETO POLIMÉRICO MODIFICADO CON
ARCILLA-LYS EN BASE A RESINA POLIÉSTER INSATURADA
PROVENIENTE DE PET POSTCONSUMO Y GRANULADOS RECICLADOS**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

QUÍMICO

PRESENTA

UZIEL TORRES CISNEROS

Tutor: **Dr. Antonio Sánchez Solís**



Ciudad Universitaria, CDMX, 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE: Prof: ÁVILA ZÁRRAGA JOSÉ GUSTAVO

VOCAL: Prof: GAVILÁN GARCÍA IRMA CRUZ

SECRETARIO: Prof: SÁNCHEZ SOLÍS ANTONIO

1er SUPLENTE Prof: BERISTAIN MONTIEL ERICK

2° SUPLENTE Prof: LÓPEZ SERRANO RAMOS FRANCISCO

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

Laboratorio de Procesamiento de Polímeros, Instituto de Investigaciones en Materiales, Ciudad Universitaria.

ASESOR DEL TEMA:



Dr. Antonio Sánchez Solís

SUPERVISOR TÉCNICO:



Dra. Mirna Rosa Estrada Yáñez

SUSTENTANTE:



Uziel Torres Cisneros

Agradecimientos.

A la Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación (SECTEI) por el apoyo económico a través del proyecto SECTEI/204/2021.

Contenido

Índice de tablas	6
Índice de figuras	8
Abreviaturas	10
Resumen	11
Objetivo	12
Objetivos particulares.....	12
Hipótesis	12
Capítulo 1. Generalidades.....	13
1.1 Concreto	13
1.1.1 Concreto Impregnado con Polímeros (CIP).....	14
1.1.2 Concreto Modificado con Polímeros (CMP).....	14
1.1.3 Concreto Polimérico (CP)	15
1.2 Resina poliéster insaturada	17
1.2.1 Fabricación de las resinas poliéster insaturada	18
1.2.2 Reacción de esterificación	21
1.2.3 Curado de la resina	22
1.2.4 Resina poliéster insaturada de botellas de PET recicladas	25
1.3 Arcilla	27
1.3.1 Definición de arcilla.....	27
1.3.2 Composición de las arcillas	28
1.3.3 Clasificación.....	29
1.3.4. Arcilla bentonita	29
1.3.5 Modificación de arcilla con L-lisina	30
1.4 Pruebas mecánicas	31
1.4.1 Esfuerzo-Deformación	32
1.4.2 Ensayo de tracción o de tensión.....	35
1.4.3 Ensayo de compresión	36
1.4.4 Módulo elástico.....	40
1.4.5 Ensayo de flexión	41
1.5 Espectroscopía Infrarroja	43

1.6 Norma NACDMX-007-RNAT-2019	47
1.7 Economía circular	49
Capítulo 2. Desarrollo Experimental.....	52
2.1 Diagrama de flujo de la metodología empleada.....	52
2.2 Materiales	53
2.3 Equipo.....	54
2.4 Preparación de la arcilla	54
2.5 Preparación de la resina poliéster insaturada	55
2.6 Preparación de probetas de resina	55
2.6.1 Preparación de probetas para determinar el contenido de monómero en la formulación con resina.....	55
2.6.2 Preparación de probetas para determinar el efecto de las impurezas (tintas) en la polimerización de la resina.....	57
2.6.3 Preparación de probetas para determinar el contenido de arcilla en la formulación con resina.....	57
2.7 Preparación de concreto polimérico.....	59
2.7.1 Propiedades del concreto con un solo tipo de gránulo	59
2.7.2 Propiedades del concreto con 2 tipos de gránulos	61
2.7.3 Propiedades del concreto con 4 tipos de gránulos	62
2.7.4 Elaboración de concreto permeable con 3 tipos de gránulos	64
2.7.5 Elaboración de concreto permeable con nanopartículas	65
2.7.6 Elaboración de concreto impermeable con 3 tipos de gránulos.....	67
2.7.7. Elaboración de concreto impermeable con nanopartículas	69
2.7.8 Elaboración de concreto reforzado con fibra de vidrio.....	70
Capítulo 3. Resultados y Discusión.....	71
3.1 Efecto del contenido de monómero para el entrecruzamiento	71
3.2 Efecto del contenido de impurezas (tintas)	75
3.3 Efecto de la arcilla en el curado de la resina	79
3.4 Evaluación de la resistencia a la compresión de concreto polimérico	82
3.4.1 Concreto con un solo tipo de gránulo	83
3.4.2 Concreto con 2 tipos de gránulos	85
3.4.3 Concreto con 4 tipos de gránulos	86

3.4.4 Concreto con 3 gránulos.....	87
3.4.5 Concreto permeable	89
3.4.6 Concreto impermeable	90
3.5 Análisis de espectroscopía infrarroja	92
Capítulo 4. Conclusiones	94
Trabajo a futuro	94
Anexos	95
Anexo A	95
Anexo B	96
Anexo C	97
Anexo D	98
Bibliografía	99

Índice de tablas

Tabla 1.1. Anhídridos comúnmente utilizados en la esterificación.....	19
Tabla 1.2. Ácidos comúnmente utilizados en la esterificación.....	19
Tabla 1.3. Polioles comunes usados en la esterificación.....	20
Tabla 1.4. Fórmula típica para elaborar resina poliéster insaturada.....	21
Tabla 1.5. Clasificación de las arcillas.....	29
Tabla 1.6. Propiedades de la lisina.....	31
Tabla 1.7. Modos de deformación.....	38
Tabla 1.8. Regiones del espectro infrarrojo.....	43
Tabla 2.1. Cantidad de monómero a variar en cada prueba.....	56
Tabla 2.2. Tinta adicionada en cada prueba.....	57
Tabla 2.3. Cantidades de arcilla para cada prueba.....	58
Tabla 2.4. Cantidades utilizadas de cada gránulo.....	59
Tabla 2.5. Relación resina-gránulos y cantidad de aglutinante necesaria.....	60
Tabla 2.6. Granulados de cada mezcla.....	61
Tabla 2.7. Relación resina-gránulos y mezcla aglutinante necesaria.....	61
Tabla 2.8. Porcentaje de cada gránulo en la mezcla 4 gránulos.....	62
Tabla 2.9. Masa de mezcla de 4 granulados para cada tubo.....	62
Tabla 2.10. Mezcla aglutinante para probetas de 4 gránulos.....	63
Tabla 2.11. Porcentaje de cada gránulo en mezcla de 3 gránulos.....	64
Tabla 2.12. Masa de mezcla de 3 gránulos por cada tubo.....	64
Tabla 2.13. Mezcla aglutinante para probetas de 3 gránulos.....	65
Tabla 2.14. Gránulos necesarios para 3 probetas de concreto permeable.....	65
Tabla 2.15. Reactivos necesarios para la mezcla aglutinante de concreto permeable con nanopartículas.....	66
Tabla 2.16. Peso de los tubos antes y después de la arena adicional.....	67
Tabla 2.17. Gránulos necesarios para 3 probetas de concreto impermeable.....	68
Tabla 2.18. Reactivos necesarios para la mezcla aglutinante de concreto impermeable.....	68
Tabla 2.19. Reactivos necesarios para la mezcla aglutinante de concreto impermeable con nanopartículas.....	69

Tabla 2.20. Fibra de vidrio para cada prueba	70
Tabla 3.1. Propiedades mecánicas a la tensión en función del monómero	71
Tabla 3.2. Propiedades mecánicas a la flexión en función del monómero	73
Tabla 3.3. Propiedades mecánicas a la tensión en función de la tinta	75
Tabla 3.4. Propiedades mecánicas a la flexión en función de la tinta.....	77
Tabla 3.5. Propiedades mecánicas a tensión en función de la arcilla.....	79
Tabla 3.6. Propiedades mecánicas a flexión en función de la arcilla.....	81
Tabla 3.7. Carga máxima y resistencia a la compresión calculada para concretos de un solo gránulo.....	84
Tabla 3.8. Resistencia a la compresión de concretos con dos granulados.....	85
Tabla 3.9. Resistencia a la compresión en función de la relación resina-gránulos en concreto de 4 gránulos.....	86
Tabla 3.10. Resistencia a la compresión en función de la relación resina-granulado en concretos con 3 granulados	88
Tabla 3.11. Reforzamiento de concreto permeable con arcilla y fibra de vidrio.....	89
Tabla 3.12. Reforzamiento de concreto impermeable con arcilla y fibra de vidrio	90

Índice de figuras

Figura 1.1. Producción de CP	17
Figura 1.2. Polímeros ramificados	17
Figura 1.3 Reacción de esterificación.....	21
Figura 1.4. Reacción de esterificación con anhídridos	22
Figura 1.5. Poliesterificación	22
Figura 1.6. Etapas del curado de un material termoestable	23
Figura 1.7. Representación de la estructura química de las cadenas de resina poliéster insaturado reticulado a partir de componentes básicos	24
Figura 1.8 Red de curado de la resina poliéster proveniente de PET	24
Figura 1.9. Estructuras compuestas según la interacción de silicatos estratificados y polímeros	25
Figura 1.10. Reacción de glicolización del PET	27
Figura 1.11. Láminas de arcilla y su estructura	28
Figura 1.12. Curva típica de esfuerzo-deformación.....	34
Figura 1.13. Montaje para prueba de tracción.....	36
Figura 1.14. Curvas de esfuerzo-deformación de distintos materiales	36
Figura 1.15. Curva de esfuerzo-deformación de un ensayo de compresión	37
Figura 1.16. Máquina de ensayos de compresión de concreto	39
Figura 1.17 Curva esfuerzo-deformación para módulo elástico	41
Figura 1.18. Ensayo de flexión de tres puntos	42
Figura 1.19. Tipos de vibraciones	44
Figura 1.20. Correlaciones comunes entre vibraciones de grupos y regiones de absorción infrarroja.....	45
Figura 1.21. Componentes de un espectrofotómetro infrarrojo dispersivo	47
Figura 1.22. Pasos de la economía circular	51
Figura 2.1. Curado de resina en el molde de silicón para formar las probetas.....	56
Figura 2.2. Prueba de tensión para probetas de resina.....	59
Figura 2.3. Gránulos de concreto reciclado.....	60
Figura 2.4. Llenado de los tubos para probetas de concreto.....	63
Figura 2.5. Ensayo de compresión de concreto permeable	66

Figura 2.6. Probeta de concreto impermeable antes y después del ensayo de compresión.....	70
Figura 3.1. Probetas de resina con 0 %, 0.5 % y 1 % de tinta.....	79
Figura 3.2. Espectros FT-IR de la resina curada sin y con arcilla a diferentes concentraciones	92

Abreviaturas

A	Sección transversal
A-L-lys	Arcilla bentonita modificada con L-lisina
ASTM	American S ociety of T esting and M aterials
CP	Concreto P olimérico
δ	Alargamiento
FT-IR	Infrarrojo por T ransformada de F ourier
g	gramos
kg_f	kilogramos-fuerza
L	Longitud inicial
mm	milímetros
P	Fuerza axial
PMEC	Peróxido de M etil- E til- C etona
PET	Politereftalato de E tileno
PVC	Policloruro de V inilo
RPI	Resina P oliéster I nsaturada
σ_f	Esfuerzo de fractura
σ_u	Esfuerzo máximo
σ_y	Límite elástico
W (%)	Humedad en porcentaje en peso

Resumen

Durante muchos años el cemento Portland ha sido el material aglutinante predilecto para elaborar concreto, debido a su bajo costo y alta versatilidad; sin embargo, el concreto convencional puede llegar a tener desventajas, como lo son la alta porosidad y una baja resistencia a esfuerzos de flexión y tensión. Así mismo, es poco resistente a reactivos altamente corrosivos, por lo que en años recientes se han buscado alternativas que otorguen mejores prestaciones.

En el presente trabajo se desarrollaron dos tipos de concreto: uno permeable y uno impermeable, a partir de granulados de concreto reciclado y resina poliéster proveniente de PET postconsumo, con el fin de presentar un material novedoso que cumpla con la normativa vigente de la ciudad.

Se analizaron diversos factores como el efecto del monómero de estireno en las propiedades mecánicas de la resina curada, el efecto de las impurezas y el impacto de la adición de arcilla químicamente modificada, observando que con 35% de monómero de estireno se obtuvieron las mejores propiedades mecánicas; además, las impurezas tuvieron un gran impacto en el curado de la resina debido a que ésta no se cura adecuadamente si existen impurezas. También se observó que con 2% de arcilla modificada las propiedades mecánicas de la resina curada mejoraron considerablemente.

Para el desarrollo de concreto se evaluó la resistencia a la compresión de concretos producidos con cuatro tipos de gránulos. También se evaluó el efecto de la arcilla y la fibra de vidrio como refuerzo del concreto. Dicho concreto mostró las mejores propiedades usando solo una mezcla con 3 tipos de gránulos (arena, 6.4 mm y 9.5 mm); además, en cada tipo de concreto (permeable e impermeable) se adicionó arcilla al 2% y fibra de vidrio al 2% y al 1 %, respectivamente, ya que con dichos reforzantes las propiedades mecánicas fueron mayores que sus contrapartes sin reforzantes.

Objetivo

Producir concreto polimérico con una resistencia a la compresión igual o mayor a 200 kg/m² para ser utilizado en la construcción de calles y banquetas, de acuerdo a la normativa vigente de la Ciudad de México.

Objetivos particulares

- Evaluar el efecto del monómero de estireno sobre las propiedades mecánicas de la resina curada.
- Evaluar el efecto del contenido de impurezas en la resina.
- Establecer la cantidad de arcilla que otorgue las mejores propiedades.
- Determinar el efecto del tamaño de los gránulos de concreto reciclado en la resistencia a la compresión del concreto.
- Obtener un concreto polimérico permeable y uno impermeable con la suficiente resistencia para ser utilizado en calles y banquetas.

Hipótesis

Los granulados de concretos reciclados están cubiertos con una capa de cemento que se degrada con el tiempo y genera porosidad en éstos, por lo que la resistencia a la compresión se reduce cuando se usan tanto en concreto hidráulico como polimérico. En este trabajo se propone que el uso de nanocompuestos de resina poliéster insaturada con arcilla-lys revierte dicho comportamiento y logra las propiedades deseadas.

Capítulo 1. Generalidades

1.1 Concreto

El concreto hidráulico es el material de construcción más utilizado alrededor del mundo, gracias a su rápida y fácil preparación, su alta eficiencia y su gran maleabilidad, convirtiéndolo en el material idóneo para las construcciones. El concreto compone de una mezcla de materiales como arena, grava, cemento Portland (el cuál sirve como aglutinante de la mezcla) agua solo durante la etapa de mezclado. Puede adquirir casi cualquier forma que se desee siempre que se vierta en un molde o encofrado, resultando en un sólido altamente resistente (Chemische Fabrik Budenheim KG, 2021).

El cemento Portland es un material inorgánico finamente molido que al ser mezclado con agua sirve como aglutinante hidráulico, formando una pasta que fragua, endurece y conserva su resistencia y estabilidad, aún bajo el agua. A todo este proceso se le conoce como hidratación. Cuando el cemento se adiciona a la mezcla de materiales (arena, grava, etc.) actúa como adhesivo y los aglutina, formando el concreto (CEMEX, 2019).

Aunque el concreto es el material fabricado más utilizados de la historia, también genera un enorme impacto ambiental debido a que la industria cementera es de las que más emisiones de CO₂ genera. Se sabe que esta industria es la fuente de aproximadamente 8% de las emisiones de dióxido de carbono del mundo. En perspectiva, si la industria del cemento fuera un país, ésta sería la tercera emisora de CO₂ en el mundo, solo detrás de China y EE. UU. La producción de cemento no solo implica la extracción de piedras en canteras (que también contamina el aire con la emisión de polvo) sino que, además, es necesario el uso de enormes hornos que consumen enormes cantidades de energía (Rodgers, 2018).

En respuesta a la alarmante situación, la comunidad científica ha desarrollado nuevas alternativas de construcción. Una de ellas es el concreto polimérico, que utiliza polímeros como aglutinante, en lugar de cemento, y que presenta excelentes propiedades.

1.1.1 Concreto Impregnado con Polímeros (CIP)

En años recientes el concreto polimérico ha recibido un gran interés debido a su gran potencial. Los primeros usos de polímeros en concreto datan de la década de 1950 (Fowler, 1999), siendo el concreto impregnado (CIP) el primer compuesto de concreto con polímeros que presentó muy buenas propiedades de resistencia y durabilidad, pero con pocas aplicaciones comerciales. En el Brookhaven National Laboratory se realizaron amplias investigaciones respecto a este material durante la década de 1960. Para ese entonces, el CIP se producía impregnando concreto de cemento Portland con un monómero de baja viscosidad, que normalmente era metacrilato de metilo, y se polimerizaba con ayuda de radiación o con técnicas catalíticas térmicas. Este material alcanzaba una resistencia a la compresión de tres a cuatro veces mayor a la del concreto tradicional; además, aumentaba la resistencia a la tracción y a la flexión, aumentando también la durabilidad y la resistencia a los ácidos gracias a su baja permeabilidad (Gündüz & Yalçin, 1987) (Chandra & Bernstsson, 1983).

1.1.2 Concreto Modificado con Polímeros (CMP)

El CMP está compuesto de cemento Portland con un modificador polimérico, entre los que destacan: el caucho de estireno-butadieno (SBR, por sus siglas en inglés), el látex acrílico, el acetato de polivinilo y el etileno-vinil-acetato (también conocido como EVA o *foamy*). Para este tipo de concreto solo es necesario adicionar entre 10 % y 20 % de polímero respecto al cemento Portland. El de mayor uso actualmente es el de SBR debido a su excelente adherencia al concreto, así como una mayor resistencia a la flexión y una menor permeabilidad. Su mayor uso es como revestimiento de suelos y puentes y solo es necesario un curado en húmedo de 24 a 48 horas para que se forme una película (Shaker, El-Dieb, & Reda, 1997)

En cuanto al látex acrílico, otro modificador común, se utiliza para producir morteros que pueden ser fácilmente aplicados sobre acabados arquitectónicos debido a que no se destiñe, además que es útil para pegar baldosas de cerámica. Todos estos tipos de CMP pueden ser mejorados con la adición de fibras que aumenten la resistencia a la tracción y reduzcan el agrietamiento (Yalçin & Gündüz, 1986)

1.1.3 Concreto Polimérico (CP)

En esencia, el concreto polimérico solo consta de agregados y un aglutinante polimérico, que bien puede ser poliéster-estireno, acrílicos y epóxidos (ya sea como resina o monómeros), convirtiéndolo en un material con un sinnúmero de usos y aplicaciones. En principio, el concreto polimérico se utilizó como material de reparación del concreto tradicional, gracias a su gran adherencia, resistencia y durabilidad (Gorninski, Dal Molin, & Kazmierczak, 2004), pero hoy en día también se emplea en la elaboración de pisos industriales, mesones para baños, cocinas, saunas, tanques para almacenamiento de agua, etc.

Con el fin de mejorar sus propiedades físicas y mecánicas, se han hecho estudios donde se evalúa el efecto de los agregados (Muthukumar & Mohan, 2004), el tamaño de sus partículas, la relación resina-agregado y, en años recientes, la adición de *refuerzos* que otorguen mejores propiedades. Estos *refuerzos* pueden llegar a modificar enormemente las propiedades de flexión y compresión. Según (Martínez-Barrera, Martínez-López, & Martínez-Cruz, 2013) el concreto polimérico reforzado con luffa (planta de estropajo) muestra una mayor elasticidad respecto al concreto sin fibras. Así mismo, (Esmaeili, Andalibi, & Gencel, 2021) señalan que el concreto polimérico de resina epóxica reforzado con fibras de acero mejora la resistencia a la compresión hasta un 23% respecto al concreto sin fibras. De igual manera, (Byron, Pacheli, Neves, Patricio de Souza, & Santiago de Oliveira, 2021), muestran que el concreto polimérico de resina epóxica reforzado con nanotubos de carbono aumenta su resistencia a la compresión hasta en un 31%; además, reduce el tiempo de curado a solo 15 días, mientras que el concreto sin nanotubos tarda hasta 28 días en curar por completo.

En cuanto a resina poliéster, (Valencia, Collazos, Mina, & Toro, 2010) muestran que el concreto polimérico basado en esta resina y modificado con escoria de alto horno y polvo cerámico llega a ser hasta un 100% mejor en pruebas de tracción y flexión respecto al concreto tradicional hecho con cemento Portland. También, en el trabajo de (Halil Akin & Polat, 2022) se muestra que los agregados pueden ser mezclados con materiales reciclados. En este estudio se utilizaron gránulos de neumáticos reciclados y cortados en tamaños de 0 a 16 mm, usando resina poliéster insaturada como aglutinante.

El concreto elaborado con gránulos de 0-4 mm resulta ser el de mejores propiedades, ya que cuando se utilizaron hasta un 5% de gránulos reciclados la resistencia a la compresión fue de 3 a 4 veces mayor que la del concreto tradicional elaborado con cemento Portland; además, con el uso de este material fue más fácil trabajar el concreto, mientras que con este tamaño de gránulos reciclados la energía consumida para la desintegración de los neumáticos fue menor que la requerida para obtener gránulos de 1 mm de diámetro.

Si pensamos en materiales reciclados, también es posible elaborar concreto polimérico con resina poliéster proveniente del reciclaje de botellas de PET. El estudio elaborado por (Rebeiz, 1996) indicó que con el PET se puede procesar y obtener resina poliéster insaturada en solo dos etapas: en la primera etapa se “digieren” las moléculas de PET mezclándolas con glicoles en un reactor y calentándolo durante varias horas en presencia de un catalizador de transesterificación. En la segunda etapa se añaden ácidos dibásicos a la solución y se produce la resina poliéster. Esta resina se diluye con monómero de estireno para reducir su viscosidad, se adicionan iniciadores y promotores de radicales libres para el curado y se mezcla con agregados inorgánicos como grava o arena. El producto de esta mezcla es un concreto polimérico con una resistencia a la compresión dos o tres veces mayor que las correspondientes a un concreto de cemento Portland.

Así mismo, (Mahdi, Abbas, & Khan, 2010) también muestran que es posible despolimerizar el PET por medio de una reacción de glicólisis usando dietilenglicol y el producto se convierte en resina poliéster, con el uso de ácidos dibásicos. Usando una relación PET/glicol de 2:1 en el proceso de despolimerización y un curado con MEKP y octoato de cobalto (como iniciador y acelerador, respectivamente) se genera un concreto polimérico que posee una resistencia a la compresión igual o mayor que el concreto tradicional.

En resumen, el concreto polimérico es un material novedoso que presenta propiedades similares e incluso superiores que su homólogo de cemento Portland; además, aprovecha materiales considerados residuos a través del reciclaje, otorgándoles una nueva vida útil.

Según lo anterior, la elaboración del CP se puede ver de una manera simplificada con el siguiente diagrama:

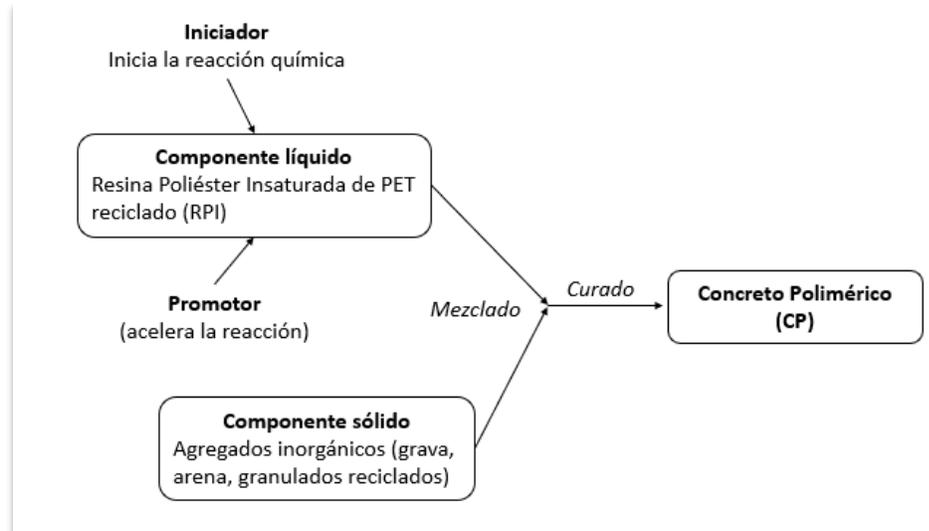


Figura 1.1. Producción de CP (Adaptado de Rebeiz, 1996)

1.2 Resina poliéster insaturada

El término polímero podríamos definirlo como una molécula constituida por la repetición, *poli*, de una unidad más simple llamada *mero* (del latín *merus*; puro, simple, que no tiene otra cosa) o monómero (Rodríguez, 1984). En algunos casos la repetición de estas pequeñas unidades es lineal, similar a una cadena formada por eslabones; en otros casos, estas cadenas son ramificadas o interconectadas debido a reacciones laterales que se dan durante la polimerización, formando *retículos* tridimensionales.

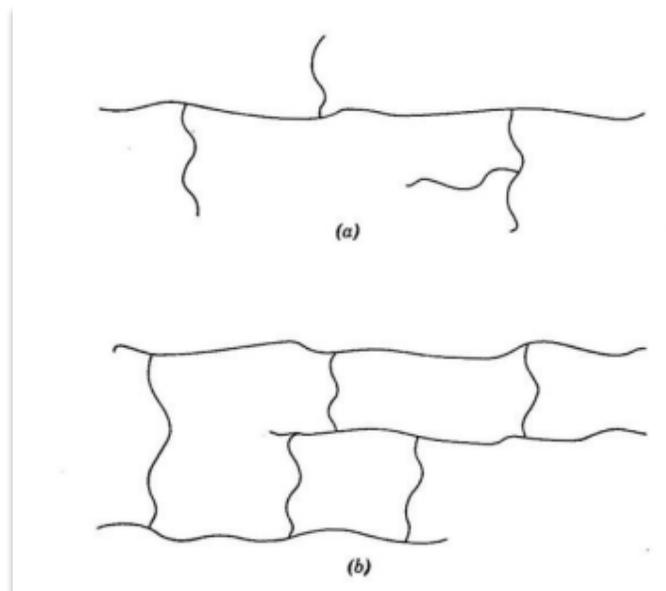


Figura 1.2. Polímeros ramificados (a) y reticulados (b) (Billmeyer, 1975)

Al hablar de retículos tridimensionales no podemos dejar de mencionar los polímeros termoestables o también llamados *resinas termoestables*. Estas son aquellas que cambian de manera no reversible bajo la influencia del calor, agentes fotoquímicos y/o de agentes químicos, pasando de ser un material líquido a otro no fusible e insoluble, gracias a la formación de retículos tridimensionales covalentes. En este proceso reactivo de entrecruzamiento o *curado*, las cadenas poliméricas reaccionan entre ellas, así como con un agente reticulante, formando grandes moléculas que se orientan en todas direcciones y con numerosos enlaces covalentes entre ellas. Estos retículos otorgan al material curado unas elevadas propiedades mecánicas, térmicas y de resistencia, haciéndolo apto para múltiples aplicaciones.

1.2.1 Fabricación de las resinas poliéster insaturada

El hecho de que los sistemas de poliésteres sean muy populares hoy en día se debe a la versatilidad de dichos sistemas, puesto que es posible fabricar productos a la medida de los requerimientos, gracias a una amplia variación en la composición de la resina. En esencia, las resinas poliéster insaturadas son polímeros de condensación que se forman por ácidos orgánicos dibásicos insaturados y alcoholes polihídricos o *polioles* con múltiples grupos alcohol o hidroxilo. Esta reacción, llamada *esterificación*, genera un poliéster y una molécula de bajo peso molecular (Rodríguez, 1984) A continuación, se detallan los componentes comúnmente utilizados:

➤ **Ácidos dibásicos**

La insaturación del poliéster es gracias a la incorporación de componentes como el anhídrido maléico o el ácido fumárico, aunque también se llega a utilizar un ácido o un anhídrido saturado (como el anhídrido ftálico o ácidos adípico, azelaico e isoftálico). Al adicionar una mayor proporción de ácido insaturado se obtiene una resina mucho más reactiva, otorgando una rigidez mayor incluso a altas temperaturas; por el contrario, el uso de componentes saturados genera polimerizaciones menos exotérmicas y resinas menos rígidas, especialmente si se usan los ácidos ftálicos (Billmeyer, 2004) (Kandelbauer, Tondi, Zaske, & Goodman, 2014).

Tabla 1.1. Anhídridos comúnmente utilizados en la esterificación

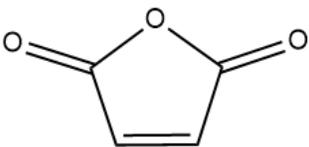
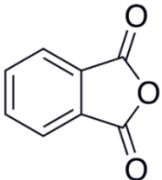
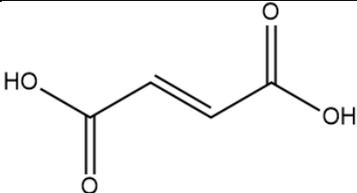
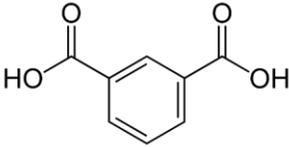
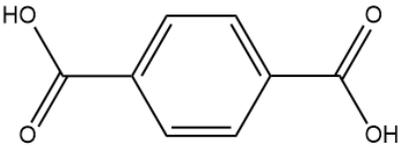
Anhídrido	Estructura química	Características
Anhídrido maleico		Genera resinas más reactivas y con mayor rigidez a altas temperaturas.
Anhídrido ftálico		La polimerización es menos exotérmica y otorga una menor rigidez.

Tabla 1.2. Ácidos comúnmente utilizados en la esterificación

Ácido	Estructura química	Características
Ácido fumárico		Co-polimeriza mejor con estireno que el anhídrido maleico.
Ácido isoftálico		Buena resistencia a la hidrólisis.
Ácido tereftálico		Mayor resistencia a la hidrólisis

➤ **Monómero**

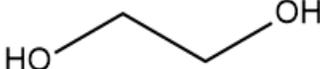
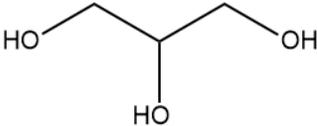
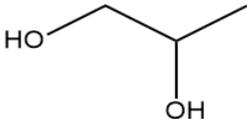
Sin duda alguna el monómero de estireno es el más utilizado en este tipo de sistemas, aunque también se puede llegar a utilizar el vinil tolueno, el metacrilato de metilo (otorgando un mejor comportamiento en sistemas que se encuentren a la intemperie), dialil ftalato (útil para compuestos de moldeo) y el cianurato de trialilo (que otorga una excelente resistencia al calor) (Billmeyer, 2004).

➤ **Alcohol polihídrico o poliol**

Los polioles más utilizados para fabricar resinas poliéster insaturadas son el etilenglicol, el glicerol y el propilenglicol, aunque también se podría utilizar una basta variedad de polioles. En general, los glicoles se presentan en forma de líquido claro, transparente, inodoro y de baja volatilidad. Además, los glicoles de bajo peso molecular son totalmente miscibles en agua y la mayoría tienen una gran capacidad para disolverse en casi todos los compuestos orgánicos (Rodríguez, 1984)

Algunas características de los glicoles mencionados son:

Tabla 1.3. Polioles comunes usados en la esterificación

Poliol	Estructura química	Características
Etilenglicol		Tiene menos compatibilidad con el estireno.
Glicerol		Alcohol trifuncional con posible entrecruzamiento en la condensación
Propilenglicol		Es el glicol más común y es más afín al estireno.

➤ **Formulación**

Con algunas características de los materiales comúnmente utilizados, es posible dar una pequeña introducción al proceso de elaboración de las resinas. En principio, los ingredientes se mezclan en un reactor para resinas y se polimerizan por medio de una reacción de condensación hasta alcanzar un peso molecular de 1000 a 5000, es decir, hasta que se genere un líquido muy viscoso. Habiéndose enfriado, la mezcla se diluye con monómero hasta que sea un líquido fluido. En ese momento se agrega un agente inhibidor (como la hidroquinona) que impida la polimerización prematura. Con esto, la resina se mantiene estable por mucho tiempo (Billmeyer, 2004).

La fórmula común en la elaboración de resina poliéster insaturada es la siguiente:

Tabla 1.4. Fórmula típica para elaborar resina poliéster insaturada (Billmeyer, 2004)

Mol	Ingrediente	kg/100 kg de resina
0.2	Anhídrido ftálico	28.86
0.2	Anhídrido maléico	19.11
0.2	Propilenglicol	14.33
0.2	Etilenglicol	12.10
0.3	Monómero de estireno	30.00
Trazas	Hidroquinona	0.02
Total		104.92

*En el proceso se pierden alrededor de 5 kg de agua

1.2.2 Reacción de esterificación

Como se ha mencionado, la producción de poliéster insaturado se lleva a cabo mediante una reacción de esterificación entre un glicol y un ácido poli carboxílico o un anhídrido, generando el éster y agua (Wade, 2012)

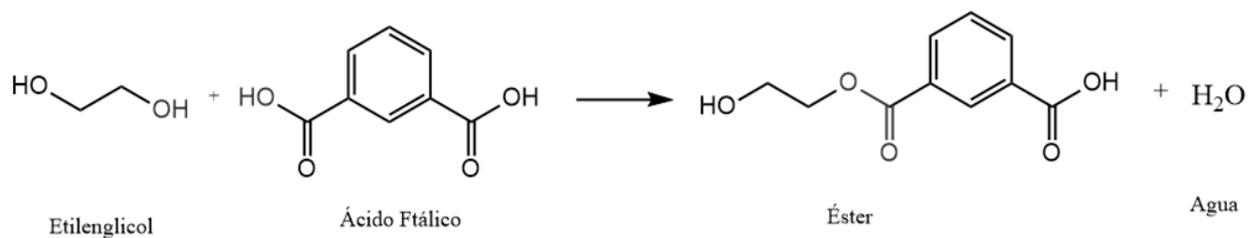


Figura 1.3 Reacción de esterificación

La reacción con anhídridos es la siguiente:

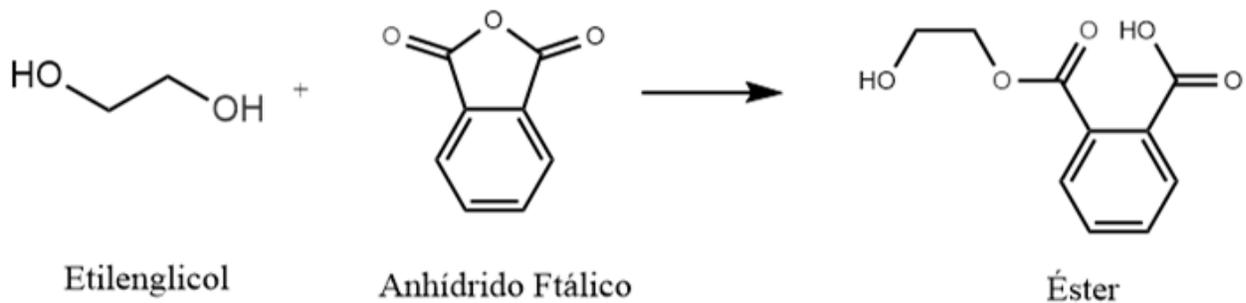


Figura 1.4. Reacción de esterificación con anhídridos

Así mismo, los poliésteres se forman cuando la esterificación se da en repetidas veces, ya sea con los ácidos carboxílicos o con los anhídridos (Sayre & Elias, 1959)

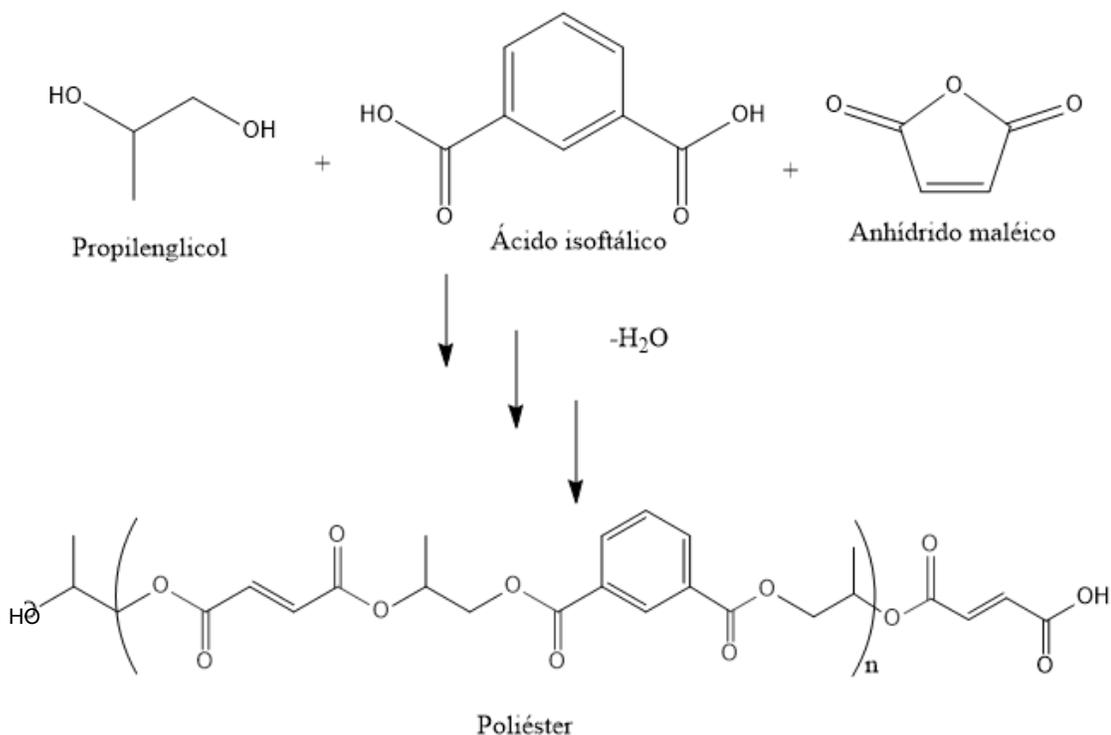


Figura 1.5. Polyesterificación

1.2.3 Curado de la resina

Generalmente la copolimerización de poliésteres insaturados es mucho más rápida con monómeros que tienen una alta insaturación olefínica que la misma homopolimerización. De esta forma, la mayoría de los poliésteres insaturados se utilizan

con mezclas de monómeros reactivos (normalmente líquidos), siendo el estireno el de mayor uso. La química de copolimerización entre poliésteres alquídicos insaturados y monómeros insaturados suele iniciarse mediante radicales libres generados por la descomposición de peróxidos, compuestos azoicos o la generación de radicales libres mediante el uso de radiación. En el caso del estireno, la reacción de copolimerización implica la adición de monómero a través de los dobles enlaces fumarato/maleato de las cadenas alquídicas. (Kandelbauer, Tondi, Zaske, & Goodman, 2014)

Durante el curado se forman y crecen linealmente las cadenas, que posteriormente se ramifican y entrecruzan. Según avanza la reacción, el peso molecular aumenta rápidamente y múltiples cadenas se unen en un retículo de elevado peso molecular. En este punto, el material pasa de ser un líquido viscoso hasta un gel elástico, que marca el inicio de la aparición del retículo. A este punto se le conoce como *punto de gelificación*. A partir de este momento, la resina deja de fluir y no puede ser procesada, siendo esta una etapa determinante del proceso y que va a depender de factores como la funcionalidad, reactividad y estequiometría.

Pasando el punto de gelificación, la reacción continúa hasta que se forma un retículo infinito, aumentando la densidad del entrecruzamiento, así como la temperatura de transición vítrea y de las propiedades físicas. (Turi, 1981)

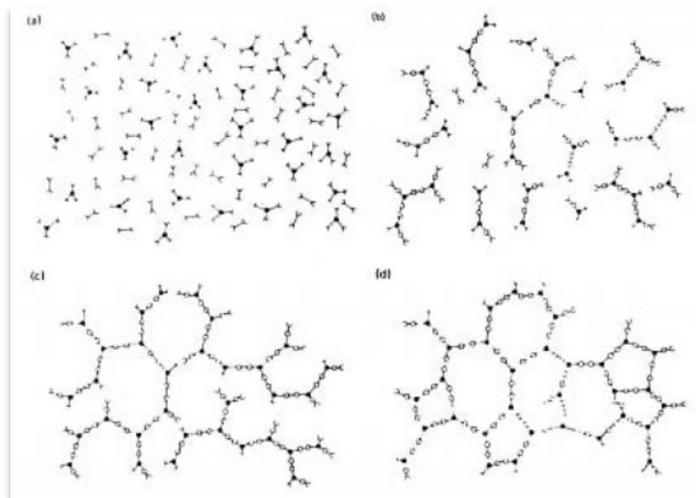


Figura 1.6. Etapas del curado de un material termoestable. (a) Monómero. (b) Crecimiento lineal y ramificación. (c) Formación del gel. (d) Curado total (Turi, 1981)

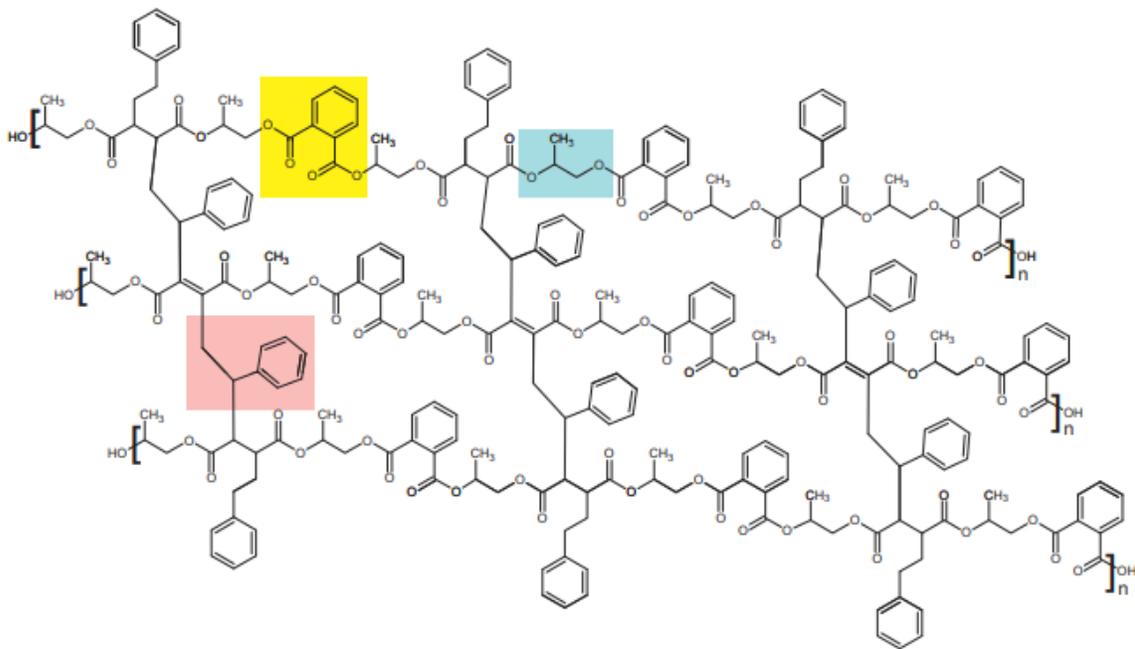


Figura 1.7. Representación de la estructura química de las cadenas de resina poliéster insaturado reticulado a partir de componentes básicos: ácido ftálico (amarillo), propilenglicol (azul) y estireno (rojo) (Kandelbauer, Tondi, Zaske, & Goodman, 2014)

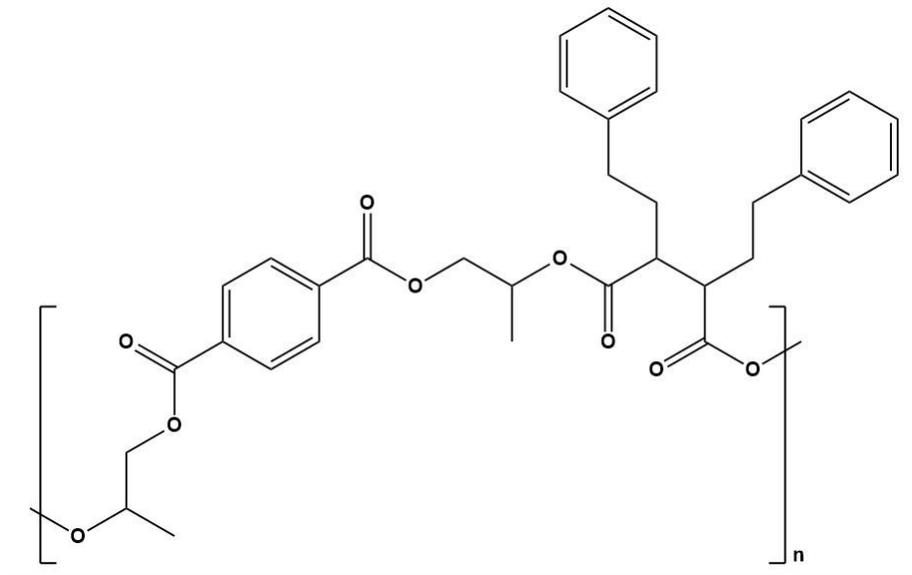


Figura 1.8 Red de curado de la resina poliéster proveniente de PET (Bórquez-Mendivil, y otros, 2022)

También se sabe que la adición de cargas de relleno inorgánicas a las resinas poliéster genera *nanocompuestos* poliméricos. Debido a su dispersión a escala nanométrica, los nanocompuestos presentan propiedades notablemente mejoradas en comparación a los polímeros puros. Los nanocompuestos de polímeros

termoendurecibles pueden prepararse por el método de polimerización intercalativa *in situ*. Estos nanocompuestos termoendurecibles tradicionalmente se preparan hinchando distintos compuestos inorgánicos (como la montmorillonita) con el monómero adecuado. Durante el hinchamiento, el monómero se difunde hasta las galerías, entra las capas del silicato y enseguida se produce la reacción de reticulación (Suh, Lim, & Park, 2000).

Según el grado de penetración, pueden obtenerse compuestos inmiscibles (los tactoides de silicato permanecen en su estado original y solo actúan como relleno a microescala), nanocompuestos intercalados (la matriz polimérica se intercala entre las capas de silicato y estas siguen un orden) y nanocompuestos exfoliados (las capas individuales de silicato de 1 nm están completamente dispersas en la matriz polimérica y las galerías están totalmente destruidas) (Schubel, Johnson, Warrior, & Rudd, 2006).

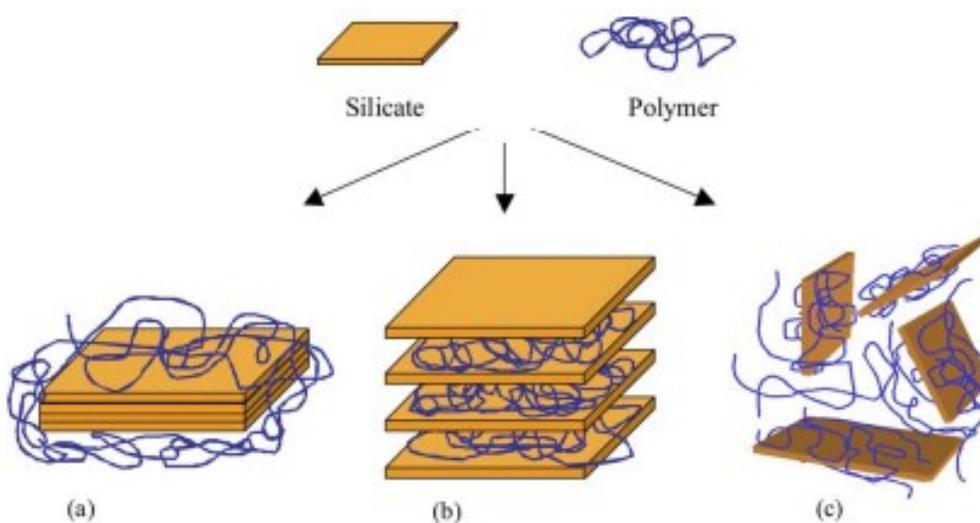


Figura 1.9. Estructuras compuestas según la interacción de silicatos estratificados y polímeros: (a) inmiscible, (b) intercalado (c) exfoliado (Schubel, Johnson, Warrior, & Rudd, 2006)

1.2.4 Resina poliéster insaturada de botellas de PET recicladas

Hoy en día el PET es uno de los plásticos más utilizados en todo el mundo, especialmente el PET de grado botella o envase, debido a su gran utilidad para almacenar líquidos. Tan solo el envase de bebidas carbonatadas representa el 58% del consumo de PET en nuestro país. En consecuencia, cada día se generan miles de toneladas de

envases que están a la espera de ser reciclados. Se sabe que en México se reciclan 1.9 millones de toneladas de plástico al año, de las cuales el PET representa el 22.1% del total de plástico reciclado, de acuerdo con las cifras de la Asociación Nacional de Industrias del Plástico. (Ambiente Plástico, 2023). En este contexto, se espera que en México se recicle el 80% del PET para el año 2030, y que, además, los envases lleguen a ser de 100% reciclables.

De tal forma, es notable que el PET representa un gran mercado en cuanto al reciclaje y se espera que el PET que se recicle tenga una nueva vida útil en nuevos materiales. Por tanto, uno de esos nuevos materiales que se pueden elaborar a partir de PET es la resina poliéster insaturada.

Si bien, la esterificación es uno de los métodos más importantes para obtener la resina poliéster insaturada, no es el único método que existe. Diversos estudios señalan que se puede obtener resina poliéster mediante glicólisis del PET, seguida de la esterificación y finalmente la disolución de los ésteres resultantes en estireno. De acuerdo con (Kandelbauer, Tondi, Zaske, & Goodman, 2014) el proceso comienza con la maceración del PET en etilenglicol, dietilenglicol o propilenglicol, así como acetato de zinc como catalizador. En esta etapa se produce glicólisis de la cadena del PET y se obtiene el tereftalato de bis-2-hidroxietileno (TBHE), el cual es el monómero que compone al PET. En seguida se hace reaccionar el TBHE con diácidos insaturados (o anhídridos) para producir la esterificación. Finalmente se mezcla con monómero de estireno y se obtiene la resina. También los autores señalan que el uso de etilenglicol genera un mayor grado de despolimerización del PET comparado contra el dietilenglicol y el propilenglicol; sin embargo, este último genera que la resina poliéster sea más compatible con el monómero de estireno.

De igual manera, el estudio hecho por (Ramírez-Palma, Alcocer-Márquez, Alcántar-González, Turati-Ramírez de Arellano, & Cruz-Gómez, 2017) afirma que la resina poliéster hecha con propilenglicol es más compatible con estireno que la resina hecha con etilenglicol, atribuyendo este hecho a las ramificaciones del propilenglicol. También declaran que la resina hecha con la mezcla de estos dos glicoles en proporción 50/50 genera mejores propiedades mecánicas que las resinas hechas con un solo glicol.

Años atrás, (Vaidya & Nadkarni, 1987) ya había usado propilenglicol en la obtención de resina poliéster. Después de glicólisis se adicionó anhídrido maleico y se mezcló con monómero de estireno para obtener la resina poliéster insaturada. En este caso se utilizaron relaciones variables de PET/propilenglicol en la reacción de glicólisis, mostrando que la relación que otorga mejores propiedades es la 50/50. Adicionalmente señalan que las resistencias al impacto y a la tracción puede llegar a ser menor que las de una resina comercial; sin embargo, este hecho se puede atribuir a un menor peso molecular y a un mayor contenido de estireno en las resinas obtenidas de PET.

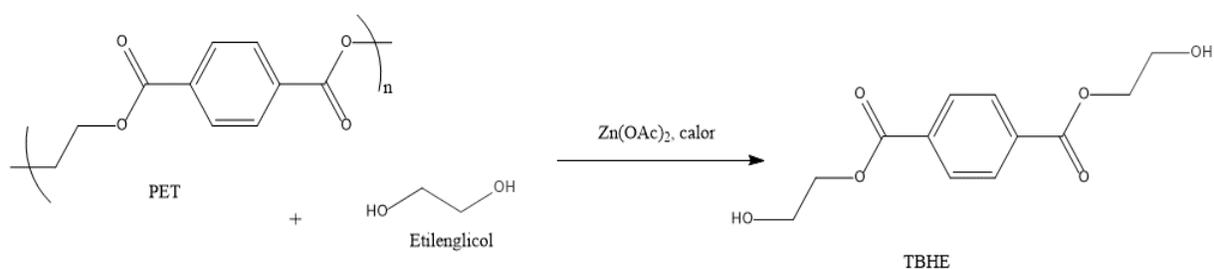


Figura 1.10. Reacción de glicolización del PET

1.3 Arcilla

1.3.1 Definición de arcilla

El término arcilla deriva del latín *argila*, que a su vez proviene del griego *argos* o *argilos* que significa “blanco”, debido al color del material que se usa en cerámica (Besoain, 1985). Estrictamente hablando, el término arcilla se puede definir según el contexto. Por ejemplo, en edafología y sedimentología se define como un material heterogéneo, compuesto de roca, óxidos hidratados, geles y sustancias orgánicas. En petrografía se le llama arcilla a una amplia variedad de materiales sedimentarios, de granulometría fina y mineralógicamente poco definidos. En términos prácticos, la arcilla se define como un tipo de suelo o roca sedimentaria que presente granos con un tamaño menor a 2 μm . Con esta definición incluimos a la mayoría de los filosilicatos y a aquellos minerales que también cumplan con este tamaño.

1.3.2 Composición de las arcillas

Al igual que los filosilicatos, las arcillas tienen una estructura que depende del apilamiento de planos de iones oxígeno e hidroxilo. Los grupos tetraédricos de $(\text{SiO})_4^{4-}$ se unen al compartir tres de sus cuatro oxígenos, formando capas de extensión finita y de fórmula $(\text{Si}_2\text{O}_5)^{2-}$. En esta los tetraedros se distribuyen formando hexágonos.

Estas capas tetraédricas se unen a otras octaédricas de tipo gibbsita o brucita. En ellas algunos Al^{3+} o Mg^{2+} , pueden estar sustituidos por Fe^{2+} o Fe^{3+} y más raramente por Li^+ , Cr^{2+} , Mn^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} o Zn^{2+} . El plano de unión entre ambas capas está formado por los oxígenos de los tetraedros que se encontraban sin compartir con otros tetraedros (oxígenos apicales), y por grupos $(\text{OH})^-$ de la capa brucítica o gibsitica, de forma que, en este plano, quede un $(\text{OH})^-$ en el centro de cada hexágono formado por 6 oxígenos apicales. El resto de los $(\text{OH})^-$ son reemplazados por los oxígenos de los tetraedros. (García & Suárez, 2016)

Una unión similar puede ocurrir en la superficie opuesta de la capa octaédrica. Así, los filosilicatos pueden estar formados por dos capas: tetraédrica más octaédrica y se denominan bilaminares, 1:1, o T:O; o bien por tres capas: una octaédrica y dos tetraédricas, denominándose trilaminares, 2:1 o T:O:T. A la unidad formada por la unión de una capa octaédrica más una o dos tetraédricas se la denomina lámina.

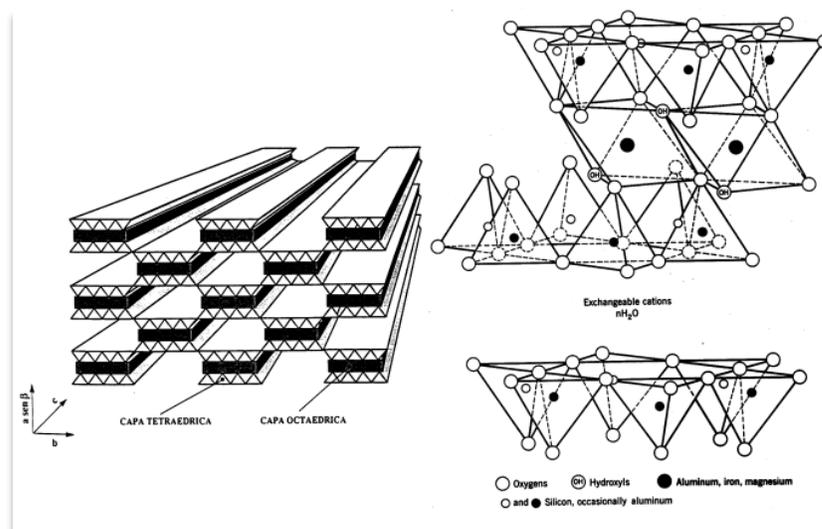


Figura 1.11. Láminas de arcilla y su estructura (García y Suárez, 2016)

1.3.3 Clasificación

Los filosilicatos se pueden clasificar de acuerdo con su estructura bilaminar o trilaminar, así como si son dioctaédricos o trioctaédricos. En la Tabla 1.5 se agrupan a los filosilicatos minerales importantes como las micas y las arcillas.

Tabla 1.5. Clasificación de las arcillas

	Dioctaédricos	Trioctaédricos	Carga
Bilaminares T:O 1:1	<u>Canditas:</u> Caolinita Dickita Halloisita	<u>Serpentina:</u> Antigorita Crisotilo Lizardita Bertierina	X=0
Trilaminares T:O:T 2:1	Pirofilita	Talco	X=0
	<u>Esmectitas:</u> Montmorillonita Beidellita Nontronita	<u>Esmectitas:</u> Saponita Hectorita	X=0.2-0.6
	Vermiculitas	Vermiculitas	X=0.6-0.9
	Illitas		X=9
	<u>Micas:</u> Moscovita Paragonita	<u>Micas:</u> Biotita Flogopita Lepidolita	X=1
T:O:T:O 2:1:1	Cloritas		
Fibrosos	Paligorskita	Sepiolita	

1.3.4. Arcilla bentonita

La bentonita es un tipo de roca que se compone por más de una clase de minerales, siendo las esmectitas el componente principal y quien les dota de sus características propiedades. Este tipo de arcilla es rica en montmorillonita y se forma por silicatos aluminicos hidratados de estructura reticular plana. Los dos principales tipos de bentonitas son la cálcica y la sódica.

La bentonita sódica puede resistir al calor y a la sequedad, así como una alta durabilidad. También, este tipo de bentonita se hincha al mezclarse con agua y puede aumentar hasta 12 veces su volumen

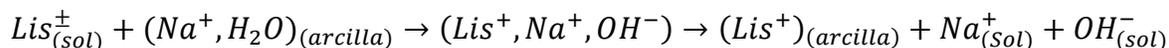
En cuanto a la bentonita cálcica, ésta es la más abundante en la naturaleza. En su estado natural posee al calcio como catión cambiante. Si se le agrega al carbonato de sodio en una cantidad correspondiente a la capacidad del cambio de cationes, puede ser transformada en bentonita sódica. La bentonita también tiene la propiedad de absorber una enorme cantidad de moléculas de proteínas de soluciones acuosas. Esto la hace ideal para usarse como arena de gatos y en la producción de alimentos para animales (Buntech del Lago S.A., 2011) (FEMISA, 2011)

1.3.5 Modificación de arcilla con L-lisina

Como ya se mencionó, las arcillas se componen de varias capas y la bentonita no es la excepción. Esta arcilla se forma de tres capas: dos capas tetraédricas y una octaédrica en medio de ambas, similar a la figura 1.8. Debido a que las interfases de la arcilla están cargadas negativamente, se puede hacer la sustitución de Magnesio (II) o Hierro (II) por Aluminio (III). Con esta estructura se tiene una alta capacidad de intercambio catiónico y una alta área superficial. Adicionalmente, la estructura también presenta grupos aluminol y silanol que sirven como protones de adsorción/desorción. De esta manera la absorción de L-lisina en la arcilla se realiza por interacción electrostática entre la carga negativa de la arcilla y la carga positiva de L-lisina (Bonilla-Blancas, y otros, 2019)

Además, se ha encontrado que el aumento en la concentración de L-lisina en la solución genera un aumento en la adsorción. Por ejemplo, para concentraciones de 0.025 M la L-lisina se adsorbe gracias a la transferencia de protones. Para concentraciones mayores (0.05 M - 0.4 M) el mecanismo principal de adsorción es por interacción L-lisina-L-lisina (Cuadros, Aldega, Vetterlein, Drickamer, & Dubbin, 2009).

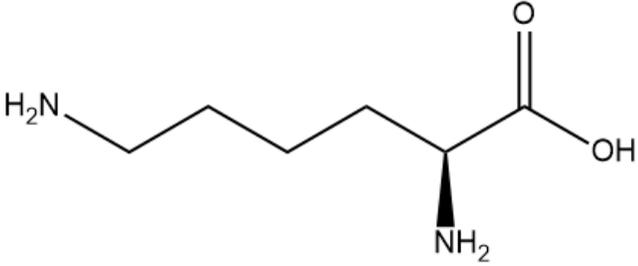
La reacción (Parbhakar, y otros, 2007) que describe el intercambio entre la arcilla y la L-lisina es la siguiente:



La lisina es uno de los 9 aminoácidos esenciales para los seres humanos. Químicamente, la lisina actúa como una base y tiene un carácter hidrofílico, puesto que su cadena lateral contiene un grupo amino protonable que comúnmente forma puentes de hidrógeno o enlaces iónicos en las cadenas de las proteínas.

A continuación se enlistan algunas propiedades de este aminoácido (National Center for Biotechnology Information, 2023):

Tabla 1.6. Propiedades de la lisina

Estructura química	
	
Fórmula molecular	C ₆ H ₁₄ N ₂ O ₂
Símbolo	Lys, K
Número CAS	70-54-2
Masa molar	146.19 g/mol
Punto de fusión	497 K (224 °C)
Acidez (pK_a)	2.15, 9.16, 10.67
Solubilidad en agua	64.2 g/100 mL
Punto isoelectrico (pH)	9.91

1.4 Pruebas mecánicas

Las pruebas mecánicas pueden ser de compresión, tracción, flexión, pruebas de corte, entre otras. Estas pruebas se llevan a cabo en laboratorios que reproduzcan fielmente las condiciones de uso rutinarias, pero dentro de un ambiente totalmente controlado para evitar que factores externos influyan en los resultados.

Con el fin de que los resultados de las pruebas sean confiables y reproducibles, diversos organismos han desarrollado metodologías estandarizadas de análisis, para que las pruebas y los resultados de éstas sean coherentes, confiables y reproducibles. Uno de esos organismos es la American Society of Testing Materials (ASTM), la cual es una organización fundada en 1898 con sede en Pennsylvania, Estados Unidos. Esta organización desarrolla y publica normas técnicas para diversas áreas, como la construcción, seguridad, protección ambiental, energía, transporte, entre otras; al mismo tiempo, sus usuarios son los propios fabricantes, proveedores de servicios, gobiernos y diversas organizaciones. Hoy en día las normas ASTM son consideradas como un punto de referencia debido a que abarcan un amplio campo de aplicación y a la multitud de sus usuarios, haciendo hincapié en la estandarización internacional y la eliminación de barreras comerciales alrededor del mundo.

1.4.1 Esfuerzo-Deformación

Al hablar de fuerzas que reciben o afectan a los materiales, es importante definir ciertos términos que ayuden a comprender mejor dichos fenómenos. El *esfuerzo* es la relación de la fuerza que actúa por unidad de área sobre la que se aplica y se denota con la letra σ (sigma):

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Donde:

P es la fuerza axial

A es la sección transversal

El esfuerzo se expresa en psi (libras por pulgada cuadrada) o en Pa (pascales o newtons por metro cuadrado) (Askeland & Wright, 2016).

El término *deformación* en los materiales se refiere a los cambios en la forma física o en las dimensiones de un material como respuesta de una fuerza o esfuerzo que se aplique sobre un material y se mide en términos de la deformación unitaria. La *deformación unitaria* es el cambio en dimensión por unidad de longitud. Esta no tiene dimensiones y se expresa como pulg/pulg o cm/cm.

Matemáticamente se denota por la letra ε (épsilon) y define por la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L}$$

Donde:

δ es el alargamiento

L es la longitud inicial

Cabe mencionar que el alargamiento también se puede escribir como ΔL debido a que éste es el cambio de longitud respecto a la longitud inicial.

Por otro lado, la *deformación elástica* se define como la deformación recuperable por completo que resulta a partir de que se aplica un esfuerzo. Dicha deformación se considera como “elástica” si se desarrolla de manera instantánea (es decir, que es tan pronto como se aplica la fuerza), permanece según se aplique el esfuerzo y rápidamente se revierte cuando el esfuerzo se retira. Así mismo, el material no debe mostrar ninguna deformación permanente (debe regresar a su forma original al eliminar el esfuerzo).

En contraparte, la *deformación plástica* es aquella que ocurre cuando el material se deforma más allá del punto en el que la deformación elástica se detiene y esta es permanente; es decir, el material no vuelve a su forma original. Es importante recalcar el hecho de que la palabra *plástica* no se refiere solo a la deformación de un plástico (polímero), sino que se extiende a cualquier material. La *fractura* es cuando un material se rompe debido a una excesiva carga.

Los ensayos de esfuerzo-deformación consisten en aplicar una carga axial que sea variable en el tiempo pero que dicha variación sea relativamente lenta. Esta carga se aplica sobre una superficie, ya sea transversal o de una pieza, y puede llegar a describir el comportamiento mecánico que se presente según la manera en que se aplique la carga. La relación entre el esfuerzo y la deformación de un material se conoce como *curva de esfuerzo-deformación* y se usa para describir el comportamiento mecánico de los materiales. Esta curva se elabora al ubicar la deformación en el eje de las abscisas y el esfuerzo en el eje de las ordenadas y es útil al momento de describir el comportamiento

de un material, por lo que puede variar según el tipo de material y las condiciones de carga. La curva típica luce de la siguiente manera:

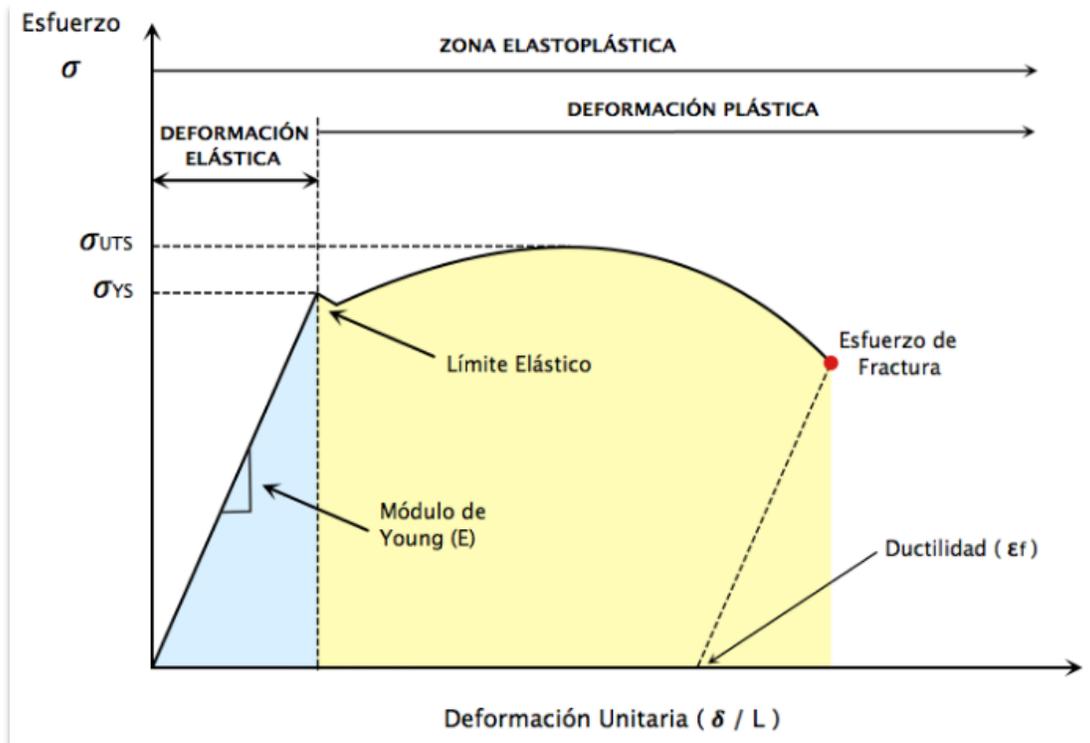


Figura 1.12. Curva típica de esfuerzo-deformación (Valdéz-Rodríguez & et.al., 2014)

De esta curva se pueden identificar puntos importantes:

- **Región de deformación elástica:** Generalmente esta región es una línea recta. Aquí el material aún regresa a su forma original.
- **Región de deformación plástica:** En esta región el material no se recupera por completo debido a los cambios permanentes en la microestructura.
- **Fractura:** Aquí el material falla después de la deformación elástica.
- **Límite elástico (σ_y):** Tensión máxima para la cual la deformación es completamente recuperable; es decir, es el punto de transición entre la deformación elástica y plástica.
- **Esfuerzo máximo (σ_u):** Punto en el cual la deformación es totalmente plástica y el material comienza a ceder.
- **Esfuerzo de fractura (σ_f):** En este punto el material se rompe por completo.

La pendiente de la curva de esfuerzo-deformación en la región elástica es un caso especial al cual se le llama *módulo de Young*, *módulo de elasticidad* o *módulo de tracción*.

El módulo de Young (E) se puede interpretar como la rigidez o la resistencia de un material a la deformación elástica; es decir, si un material tiene energías de enlace altas tendrá un alto módulo elástico, puesto que se requiere una mayor fuerza para estirarlo, se mide en libras por pulgada cuadrada (psi) o en Pascales (Pa) al igual que el esfuerzo (Newell, 2011).

Matemáticamente se describe como:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Donde:

σ es la tensión ejercida sobre el área de la sección transversal del elemento

ε es la deformación unitaria

1.4.2 Ensayo de tracción o de tensión

Aunque una variedad de materiales puede ser sometidos a este procedimiento, todos se basan en los mismos principios básicos de operación. Con este método se determina la resistencia a la tracción, la resistencia a la ruptura y la resistencia a la conformación de una muestra y se realiza en una máquina universal de pruebas (Newell, 2011).

La muestra se coloca entre un par de abrazaderas. La abrazadera superior está sujeta a una barra fija y a una celda de carga, mientras que la abrazadera inferior está sujeta a una barra móvil que lentamente empuja el material hacia abajo. La celda de carga registra la fuerza y un extensómetro registra el alargamiento de la muestra. En esta prueba se registra la longitud original del espécimen (l_0) y se mide el cambio de longitud del espécimen (Δl). De este ensayo se puede obtener la resistencia a la tracción (que es el esfuerzo máximo en la curva), el módulo de Young y la ductilidad del material.

Las siguientes figuras muestran el montaje común sobre la máquina de pruebas y algunas curvas comunes de esfuerzo-deformación bajo tensión de distintos materiales.

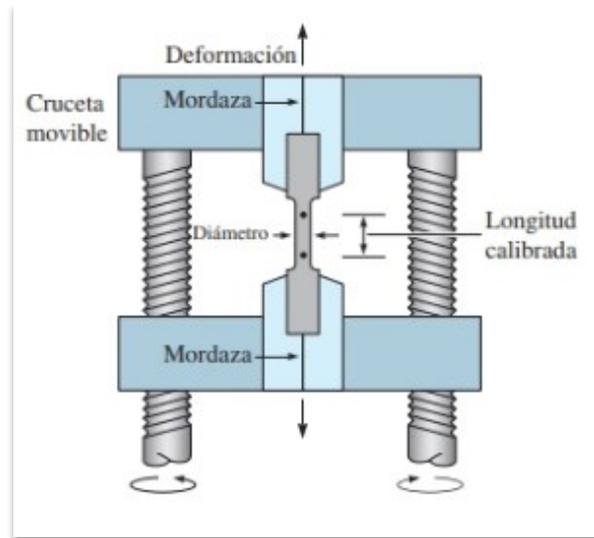


Figura 1.13. Montaje para prueba de tracción (Askeland & Wright, 2016)

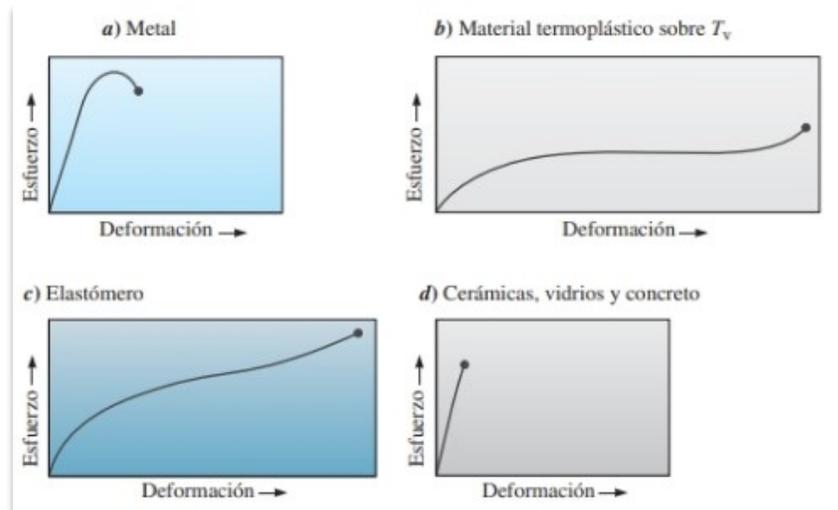


Figura 1.14. Curvas de esfuerzo-deformación de distintos materiales (Askeland & Wright, 2016)

1.4.3 Ensayo de compresión

Este tipo de ensayo es un análogo directo de la prueba de tracción. En este caso, se utiliza la misma máquina de pruebas, pero en lugar de separar la muestra, ésta se somete a una carga aplastante. En este ensayo la muestra se coloca en medio de dos

platos de compresión que generan una presión sobre el espécimen. Los datos obtenidos proporcionan diagramas de tensión-deformación donde se muestra el límite elástico, el límite de proporcionalidad, el límite de fluencia y la resistencia a la compresión (Zwick Roell, 2019). Debido a que varios materiales muestran módulos y resistencias de tracción y compresión similares, los ensayos de compresión no se realizan, salvo casos donde se espera que el material soporte grandes fuerzas de compresión.

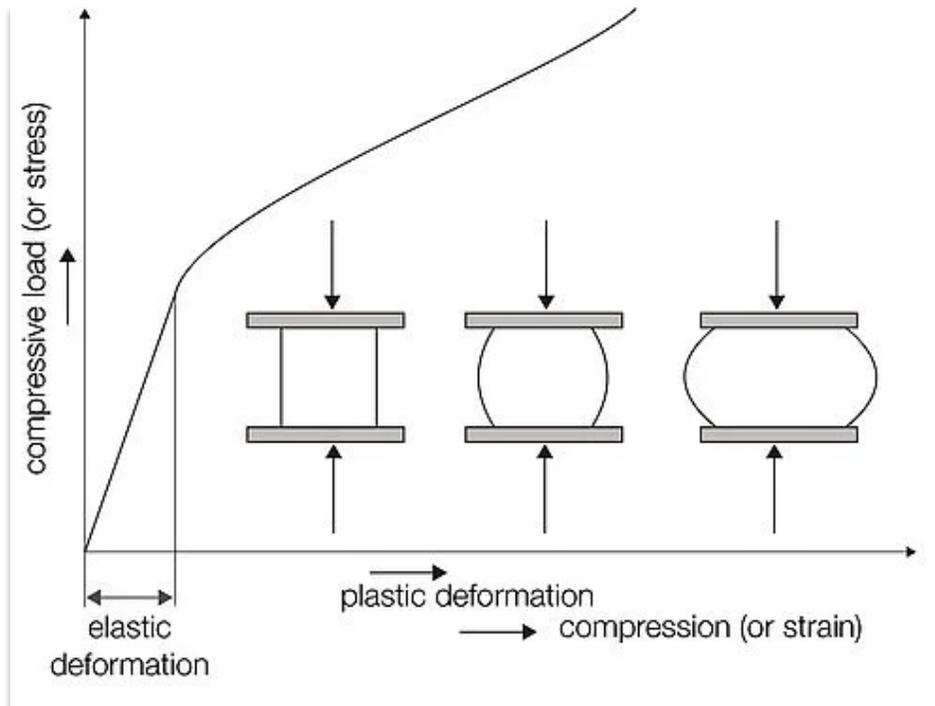
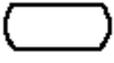
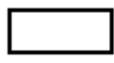


Figura 1.15. Curva de esfuerzo-deformación de un ensayo de compresión (Zwick Roell, 2019)

El ensayo de compresión permite una evaluación directa al modo de deformación, según la relación L/D (Tabla 1.7) de tal manera que una $L/D > 5$ genera una deformación curvada; de corte cuando $2.5 < L/D < 5$; de compresión homogénea cuando $L/D < 2$; de barril cuando hay fricción en el contacto con la superficie y $L/D < 2$ y, finalmente, de doble barril cuando $L/D > 2$ y hay fricción. También se llegan a observar inestabilidades de compresión.

Tabla 1.7. Modos de deformación (Newell, 2011)

Modo de deformación	Forma resultante	Condición
Curveada		$L/D > 5$
De corte		$2.5 < L/D < 5$
De doble barril		Hay fricción al contacto con la superficie; $L/D > 2$
De barril		Hay fricción al contacto con la superficie; $L/D < 2$
Compresión homogénea		$L/D < 2$
Inestabilidad de compresión		

La resistencia a la compresión es la medida que se emplea comúnmente para evaluar el desempeño del concreto, ya que muestra la capacidad del concreto a soportar cargas de aplastamiento en un área determinada. El ensayo, al igual que en otros materiales, consiste en colocar un cilindro de concreto de determinadas dimensiones en medio de dos platos que generan una presión sobre la muestra. Este tipo de ensayos suelen ser destructivos sobre las probetas cilíndricas, las cuales se someten a cargas exponenciales de aplastamiento hasta encontrar el punto de ruptura. Los resultados de las pruebas se pueden utilizar como control de calidad, para estimar la resistencia del concreto en estructuras, para programar las operaciones de construcción o para evaluar la conveniencia de curado y protección suministrada a la estructura. En la mayoría de los casos los ensayos se realizan a los 28 días de curado debido a razones técnicas y prácticas, ya que después de 28 días casi se ha alcanzado el máximo de resistencia (CEMEX, 2021) (Osorio, Resistencia mecánica del concreto y resistencia a la compresión, 2022).

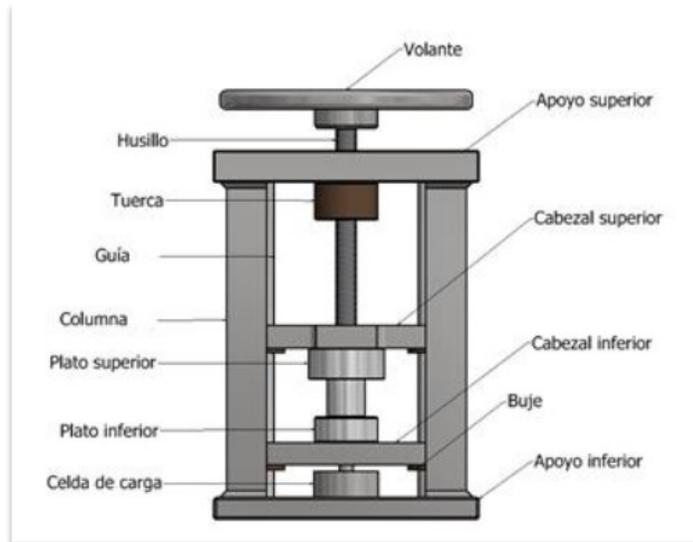


Figura 1.16. Máquina de ensayos de compresión de concreto (Crespo, Figueroa-Hernández, Carvajal de la Osa, Gómez-González, & Fumero-Pérez, 2020)

En México, para estimar la resistencia del concreto, se utiliza la norma NMX-C-083-ONNCCE-2002. En esta norma se establecen los métodos de prueba para determinar la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos moldeados.

Según la norma, la máquina debe ser de tipo a compresión o universal, con capacidad suficiente y que pueda funcionar a la velocidad de aplicación de la carga especificada. El diámetro y la altura del espécimen deben determinarse promediando las medidas de 2 diámetros perpendiculares entre si a una altura media del espécimen y 2 alturas opuestas de 1 mm; además, la base de los especímenes o caras de aplicación de carga no deben alejarse de la perpendicular al eje en más de 0.5° , aproximadamente 3 mm en 300 mm y no se permiten irregularidades respecto al plano que excedan de 0.05 mm. La velocidad de carga debe estar entre 84 kgf/cm^2 y 210 kgf/cm^2 equivalente para un diámetro estándar de 15 cm a un rango de 14.8 tonf/min a 37.1 tonf/min , aplicándose la carga hasta que aparezca la falla de ruptura.

La resistencia a la compresión se calcula dividiendo la carga máxima soportada durante la prueba entre el área promedio de la sección transversal determinada con el diámetro medido. Los resultados se expresan con una aproximación de 1 kgf/cm^2 (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación S.C., 2014).

1.4.4 Módulo elástico

La elasticidad es la propiedad mecánica por la cual los materiales sufren deformaciones reversibles gracias a la acción de fuerzas externas que actúan sobre ellos. Como se comentó anteriormente, el módulo elástico es la relación entre el esfuerzo al que se somete un material y su deformación elástica, mostrando la rigidez del material ante una carga. Si la relación esfuerzo-deformación unitaria es lineal, constante y los esfuerzos aplicados no alcanzan el límite de proporcionalidad, se cumple la Ley de Hooke.

En el concreto, el módulo elástico representa la rigidez de dicho material ante una carga que se le impone. El ensayo para determinar el módulo elástico se hace bajo la norma ASTM C469 y tiene como principio la aplicación de carga estática y la correspondiente deformación unitaria producida.

El módulo elástico se obtiene calculando la pendiente de un segmento de recta que pase por dos puntos A y B de la curva típica de esfuerzo-deformación de un concreto bajo compresión, para lo cual es necesario obtener la ordenada correspondiente a las 50 micro deformaciones y la abscisa correspondiente al esfuerzo $0.40 f'c$. El módulo elástico es aplicable dentro del rango habitual de esfuerzos de trabajo (de 0 a 40 % de la resistencia máxima del concreto) (Osorio, 2022)

Con el área del espécimen, las cargas, las lecturas de deformación y la longitud de medición se calculan los esfuerzos y las deformaciones unitarias de cada carga, así como el esfuerzo máximo. Luego, se determina el esfuerzo S_1 correspondiente la deformación unitaria (e_1) de 0.000 050. En seguida se determina el esfuerzo S_2 correspondiente al 40 % del máximo esfuerzo. Después, se determina la deformación unitaria (e_2) correspondiente al esfuerzo S_2 . (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C., 2009)

Se calcula el módulo elástico como:

$$E = \frac{S_2 - S_1}{(e_2 - 0.000\ 050)}$$

Donde:

E es el módulo elástico en kg/cm²

S₂ es el esfuerzo al 40% del esfuerzo máximo

S₁ esfuerzo a la deformación 0.000 050

e₂ es la deformación al esfuerzo S₂ (40% del esfuerzo máximo)

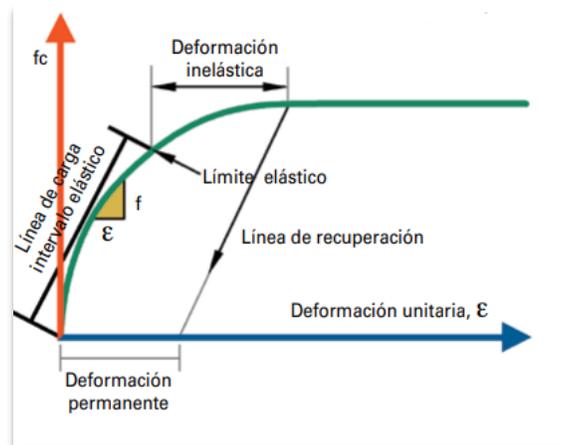


Figura 1.17 Curva esfuerzo-deformación para módulo elástico

1.4.5 Ensayo de flexión

También llamado *ensayo de plegado*, este método se utiliza para medir la resistencia a la flexión de un material *frágil*. En el momento que la muestra comienza a deformarse bajo una fuerza aplicada, la parte inferior experimenta una tensión a la tracción mientras que la parte superior experimenta una tensión de compresión (Newell, 2011). Se considera un material frágil a aquel que falla por completo al inicio de la deformación plástica y su gráfica de esfuerzo-deformación suele ser lineal.

Para un sistema de tres puntos, se aplica una fuerza a la parte superior de la superficie de la muestra, colocando la parte superior en compresión. Un par de rodillos circulares, separados por una distancia conocida, soportan la parte inferior de la muestra.

Cuando la parte inferior de la muestra comienza a desviarse, la parte inferior experimenta una resistencia a la tracción, cuyo máximo se concentra justo arriba de los rodillos.

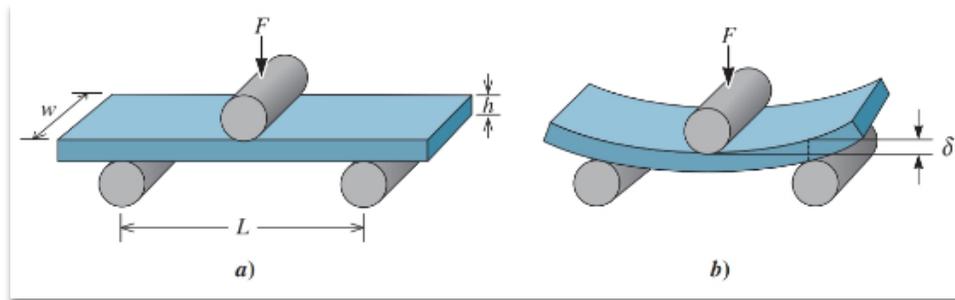


Figura 1.18. Ensayo de flexión de tres puntos donde se mide: (a) la resistencia. (b) la deflexión (Askeland & Wright, 2016)

De esta prueba se obtiene la resistencia a la flexión σ_f que tiene unidades de esfuerzo y se define como:

$$\sigma_f = \frac{3F_f L}{2wh^2}$$

Donde:

F_f es la carga de la falla o fractura

L es la distancia entre los rodillos

w es el ancho del espécimen

h es el alto de los especímenes

También podemos obtener también el módulo de flexión E_f que se define como:

$$E_f = \frac{F_f L^3}{4wh^3 \delta}$$

Donde:

F_f es la carga de la falla o fractura

L es la distancia entre los rodillos

w es el ancho del espécimen

h es el alto de los especímenes

δ es la desviación experimentada por el material durante el doblado

1.5 Espectroscopía Infrarroja

La espectroscopía infrarroja (IR) es una técnica analítica que se utiliza para identificar moléculas y compuestos por medio de la medición de las vibraciones moleculares en la región del infrarrojo del espectro electromagnético.

La región del infrarrojo del espectro abarca a la radiación con números de onda que van desde los 12,8000 a los 10 cm^{-1} , que corresponde a una longitud de onda de 0.78 a 1000 μm . Por practicidad, es conveniente dividir el espectro infrarrojo en tres regiones: cercano, medio y lejano. En la Tabla 1.8 se enlistan los límites de cada región (Skoog, Holler, & Nieman, 2001)

Tabla 1.8. Regiones del espectro infrarrojo

Región	Intervalo de longitud de onda (λ), μm	Intervalo de número de onda (ν), cm^{-1}	Intervalo de frecuencias (ν), Hz
Cercano	0.78 a 2.5	12,800 a 4,000	3.8×10^{14} a 1.2×10^{14}
Medio	2.5 a 20	4,000 a 200	1.2×10^{14} a 6.0×10^{12}
Lejano	50 a 1,000	200 a 10	6.0×10^{12} a 3.0×10^{11}
La más utilizada	2.5 a 15	4,000 a 670	1.2×10^{14} a 2.0×10^{13}

Hasta principios de los años ochenta los instrumentos para la región del infrarrojo medio eran los más comunes y se basaban en el fenómeno dispersivo, contando con la presencia de redes de difracción. Sin embargo, por eso años se introdujeron al mercado los instrumentos del tipo transformada de Fourier. Desde la llegada de este tipo de equipos se han convertido en los de mayor presencia, pues han aumentado notablemente el número de aplicaciones de la radiación del infrarrojo, lo que a su vez hizo que se volvieran baratos.

La principal razón de este repentino auge se basa en el aumento de la relación señal/ruido, así como de los límites de detección que pueden ser mayores que con los instrumentos antiguos.

La radiación en el infrarrojo no es lo suficientemente energética como para producir las transiciones electrónicas que se dan con la radiación UV, visible y de rayos X. La absorción de radiación en el infrarrojo se limita a especies moleculares para las cuales existen pequeñas diferencias de energía entre los distintos estados vibracionales y rotacionales; es decir, para absorber radiación en el infrarrojo es necesario que una molécula sufra un cambio neto en el momento dipolar como consecuencia de su movimiento de vibración o rotación. Solo así es posible que el campo eléctrico alterno de la radiación interactúe con la molécula y provoque cambios en la amplitud de alguno de sus movimientos. En otras palabras, una molécula absorberá energía infrarroja solo cuando dicha energía sea igual a la necesaria para que se dé una transición vibracional de la molécula. Por lo tanto, es posible distinguir dos categorías básicas de vibraciones: de tensión y de flexión. Las vibraciones de tensión son cambios en la distancia interatómica a lo largo del eje de enlace entre dos átomos, mientras que las vibraciones de flexión están originadas por cambios en el ángulo que forman dos enlaces. A continuación, se presentan los tipos de vibraciones moleculares:

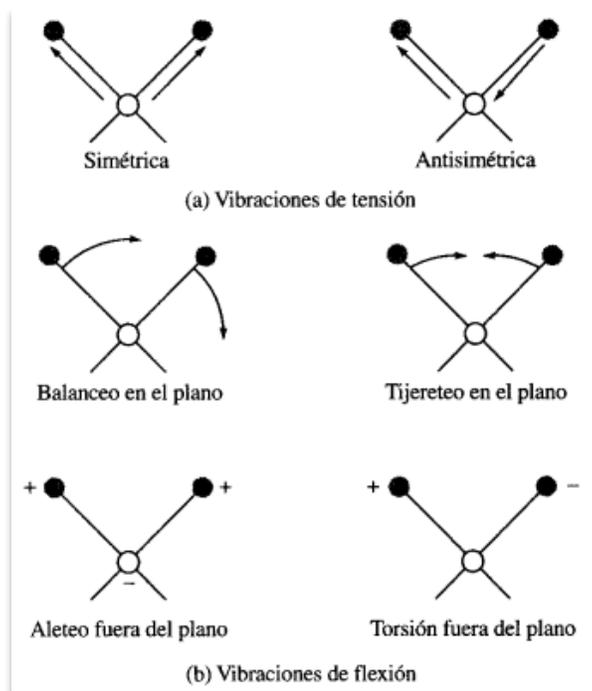


Figura 1.19. Tipos de vibraciones: (a) de tensión (b) de flexión (Skoog, Holler, & Nieman, 2001)

Debido a que cada grupo absorbe dentro de cierta longitud de onda, además que la longitud de onda exacta está influida por los grupos vecinos, un espectro IR se puede interpretar con base en dos regiones: La región del grupo funcional que abarca hasta $\geq 1500 \text{ cm}^{-1}$, donde solo hay pocos canales por grupo funcional, y la región fingerprint o de huellas dactilares, que abarca a $< 1500 \text{ cm}^{-1}$ y hay muchos canales que forman un patrón intrincado que se puede usar como “huella dactilar” para determinar un compuesto.

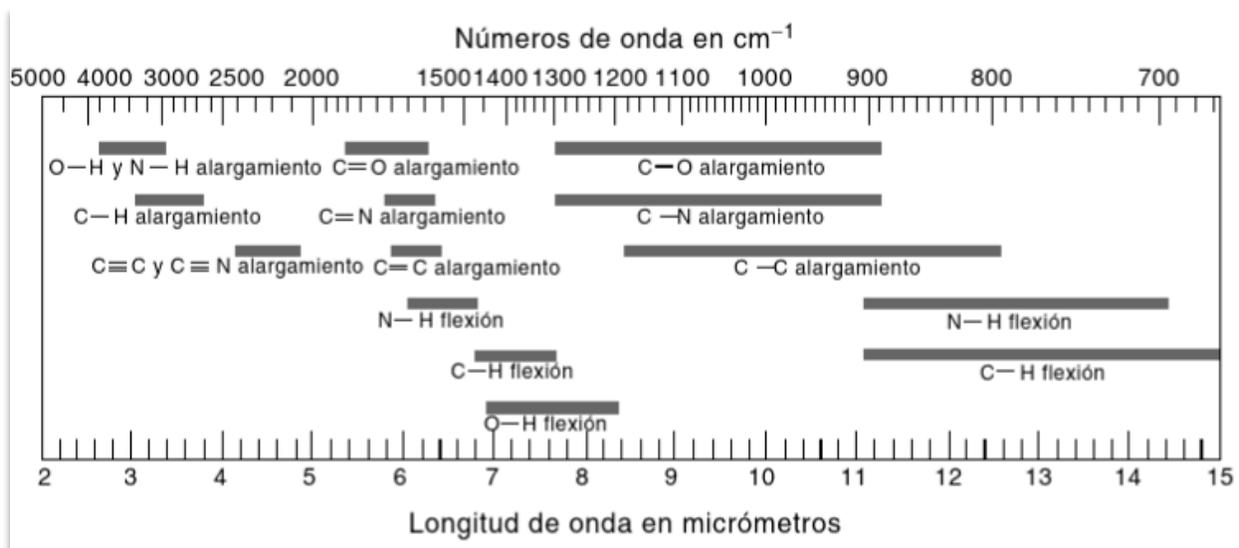


Figura 1.20. Correlaciones comunes entre vibraciones de grupos y regiones de absorción infrarroja (Skoog, Holler, & Nieman, 2001)

La obtención de espectros IR se puede llevar a cabo a través de las siguientes técnicas (Universidad de Alicante, 2022)

- **Transmisión:** En este método la radiación IR atraviesa la muestra y se registra la cantidad de energía que absorbe la muestra. A partir de la comparación de la radiación registrada tras atravesar la muestra, con un experimento de referencia se obtiene el espectro IR. Esta técnica permite analizar con los accesorios adecuados, muestras gaseosas, líquidas y sólidas. En caso de muestras sólidas, éstas se muelen junto con KBr en polvo (ópticamente transparente) y se prensa para obtener una pastilla delgada que se expone a la radiación infrarroja.
- **Reflexión:** La radiación infrarroja es reflejada sobre la muestra. Analizando la radiación reflejada y comparándola con la radiación incidente se obtiene

información molecular de la muestra. Para utilizar esta técnica de medida la muestra debe ser reflectante o estar colocada sobre una superficie reflectante.

- **Modo ATR:** Es un modo de muestreo en el que el haz IR se proyecta en un cristal de alto índice de refracción. El haz se refleja en la cara interna del cristal y crea una onda evanescente que penetra en la muestra. Ésta debe estar en íntimo contacto con el cristal. Parte de la energía de la onda evanescente es absorbida y la radiación reflejada (con la información química de la muestra) es conducida al detector. Se trata de un método muy versátil que permite la medida de muestras líquidas y sólidas sin prácticamente preparación de estas.

En general, el espectrofotómetro infrarrojo se equipa con una fuente de emisión de radiación infrarroja, que normalmente es en una barra de un material cerámico. La radiación emitida por esta fuente se divide en dos haces al atravesar una serie de espejos. De los dos haces uno de ellos pasa por una celda que contiene una disolución del compuesto orgánico (haz de la muestra) que se desea estudiar, mientras que el otro haz atraviesa una celda que sólo contiene el disolvente empleado (haz de referencia). Los dos haces se dirigen luego hacia un dispositivo que permite el pase alternativamente de un haz y luego del otro (interruptor rotatorio). El haz se dirige a la rejilla de difracción donde se separa en las longitudes de onda que lo componen (espectro de IR).

Estas radiaciones, separadas por su valor de longitud de onda, pasan a través de una ranura y llegan al detector. El detector es una bobina de alambre cuya resistencia aumenta debido al calentamiento que produce la radiación incidente. Así pues, la resistencia del detector depende de la intensidad de la radiación. La acción del interruptor rotatorio permite alternar la llegada al detector del haz de la muestra con la llegada del haz de referencia, pudiéndose comparar estas señales mediante una serie de circuitos eléctricos. Como la absorción por el disolvente es la misma en ambas celdas el efecto de éste se puede restar y el registrador recibe sólo las señales debidas a la absorción de la muestra.

En el siguiente diagrama se ilustran las partes de un espectrofotómetro:

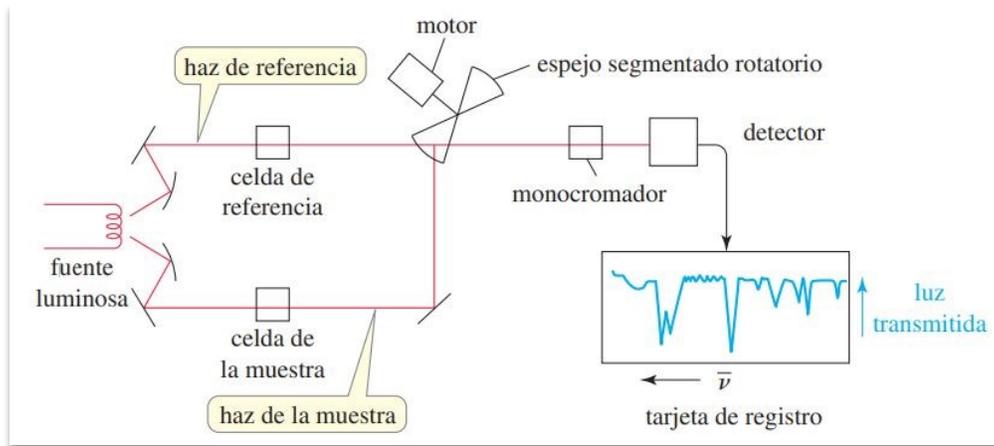


Figura 1.21. Componentes de un espectrofotómetro infrarrojo dispersivo (Wade, 2012)

1.6 Norma NACDMX-007-RNAT-2019

A raíz del sismo de 2017, hasta el año 2019 se tenían contabilizadas 4,757 edificaciones en espera de ser demolidas solo en la Ciudad de México, debido al alto riesgo de colapso. También, fue necesaria la demolición de 1,506 edificios por el mismo motivo, generando una enorme cantidad de residuos que necesitaban ser tratados.

Según datos publicados en el diagnóstico del Programa de Gestión Integral de los Residuos Sólidos para la Ciudad de México (PGIRS) 2016-2020, durante el año 2014 se generaron 12,003,359.51 de metros cúbicos de residuos provenientes de la construcción solo en la Ciudad de México. El riesgo radica en que estos residuos deben tener un manejo especial, debido a su alto impacto en el ambiente (si se da una disposición inadecuada) y a la cantidad de material que se genera (Secretaría del Medio Ambiente, 2016). En respuesta, la Secretaría del Medio Ambiente dio a conocer a través de la Gaceta Oficial de la Ciudad de México la norma ambiental para la Ciudad de México NACDMX-007-RNAT-2019, la cual se publicó el 10 de Julio del 2019. (Secretaría del Medio Ambiente, 2019).

En dicha norma se establece la clasificación y especificaciones de manejo integral para los residuos de la construcción y demolición en la Ciudad de México, con el fin de

impulsar una economía circular gracias al alto potencial de reúso y reciclaje de estos residuos, pudiendo ser utilizados como agregados reciclados.

La normativa indica que los generadores de Residuos de la Construcción y Demolición (RCD) deben cumplir con ciertas especificaciones en las diversas fases del manejo integral de residuos, las cuales son:

- a) Separación de residuos
- b) Acopio
- c) Almacenamiento
- d) Recolección y transporte
- e) Valorización
- f) Disposición final

En el apartado 8.6.2 menciona que los agregados reciclados provenientes del material residual deben ser incorporados a obras privadas y públicas en elementos no estructurales, como pisos, banquetas, ciclistas, etc., en un porcentaje que va del 35 % hasta el 100 %.

Por otro lado, lado, las *normas técnicas complementarias del reglamento de construcciones para el Distrito Federal* señalan que la resistencia a la compresión del concreto clase 2 no será menor que 200 kg/cm^2 , mientras que el concreto clase 1 tendrá una resistencia igual o mayor que 250 kg/cm^2 . (Gobierno del Distrito Federal, 2022) (Secretaría de Obras y Servicios, 2021)

En este sentido, con el presente trabajo se pretende plantear un método de aprovechamiento y revalorización de los agregados provenientes de los RCD que, junto a una resina obtenida con el reciclaje de PET, incorpora dos elementos que de otro modo solo serían desechos; al mismo tiempo, se cumple con la normativa vigente en la Ciudad de México mientras se impulsa la economía circular.

1.7 Economía circular

Actualmente el modelo de consumo predominante se basa en el principio de recursos infinitos (economía lineal); es decir, extraer, producir y desechar, sin embargo, los recursos del planeta no son infinitos, lo que está llevando a alcanzar el límite de su capacidad física. Tan solo en la Unión Europea se producen más de 2,500 millones de toneladas de residuos al año, lo que implica en una enorme generación de residuos y una cantidad similar de recursos que deben ser extraídos para cubrir esas necesidades.

Como alternativa se tiene el modelo de *economía circular*, el cual se basa en reducir los residuos al mínimo. Si bien la idea de retroalimentación y de ciclos en sistemas en el mundo real es vieja y surge en varias escuelas filosóficas, ésta resurgió en países industrializados después de la Segunda Guerra Mundial, cuando estudios computarizados de sistemas no-lineales revelaron la naturaleza compleja, conectada e imprevisible de nuestro mundo, que se parece más a un metabolismo que a una máquina. Teniendo en cuenta los avances recientes y las tecnologías digitales, ahora se tiene el poder de apoyar la transición hacia una economía circular mediante el aumento radical de la virtualización, desmaterialización, transparencia e inteligencia generada por ciclos de retroalimentación. Cuando un producto llega al final de su vida útil, sus materiales pueden mantenerse dentro de la economía siempre que sea posible y gracias al reciclaje. Estos productos pueden ser productivamente utilizados una y otra vez, generando un valor adicional. Este modelo va más allá y también promueve el compartir, alquilar, reutilizar, reparar y renovar materiales y productos existentes todas las veces que sea posible, de tal manera que el ciclo de vida de los productos se extiende. (Ellen Macarthur Foundation, 2017)

El cambio a este tipo de economía traería múltiples beneficios como son:

- **Cuidado del ambiente.** Al reutilizar y reciclar productos que ya han sido utilizados se ralentiza el uso de recursos naturales, reduciendo el deterioro del paisaje y del hábitat de muchísimas especies, lo que conlleva a limitar la pérdida de biodiversidad. Adicionalmente se reduce la emisión de gases de efecto invernadero.

-
- **Reducción de la dependencia de materias primas.** Como bien se mencionó, el modelo económico dominante depende de un constante suministro de materias primas que día a día tienen una demanda mayor. Varias materias primas cruciales son finitas, pero la demanda mundial va en aumento a la par del crecimiento de la población mundial. También ayuda a reducir la dependencia de otros países para suplir materias primas por medio del reciclaje de productos. El reciclaje de materias primas reduce los riesgos asociados al suministro, como la volatilidad de los precios, la disponibilidad y la dependencia de las importaciones.
 - **Creación de nuevos empleos y ahorro de dinero a los consumidores.** La transición hacia una economía más circular podría aumentar la competitividad, estimular la innovación, impulsar el crecimiento económico y crear nuevos empleos. También, el rediseño de materiales y productos impulsaría la innovación en diversos sectores de la economía.

Para alcanzar estos objetivos, la Comisión Europea presentó en marzo de 2020 el plan de acción para la economía circular que tiene como objetivo el producir artículos más sostenibles, reducir los residuos y empoderar a los ciudadanos y consumidores.

En marzo de 2022, la Comisión dio a conocer el primer paquete de medidas para acelerar la transición hacia una economía circular, como parte del “plan de acción de economía circular”. Las propuestas incluyen el impulso de los productos sostenibles, el empoderamiento de los consumidores para la transición verde, la revisión de la normativa sobre productos de la construcción y una estrategia sobre textiles sostenibles (Parlamento Europeo, 2023)

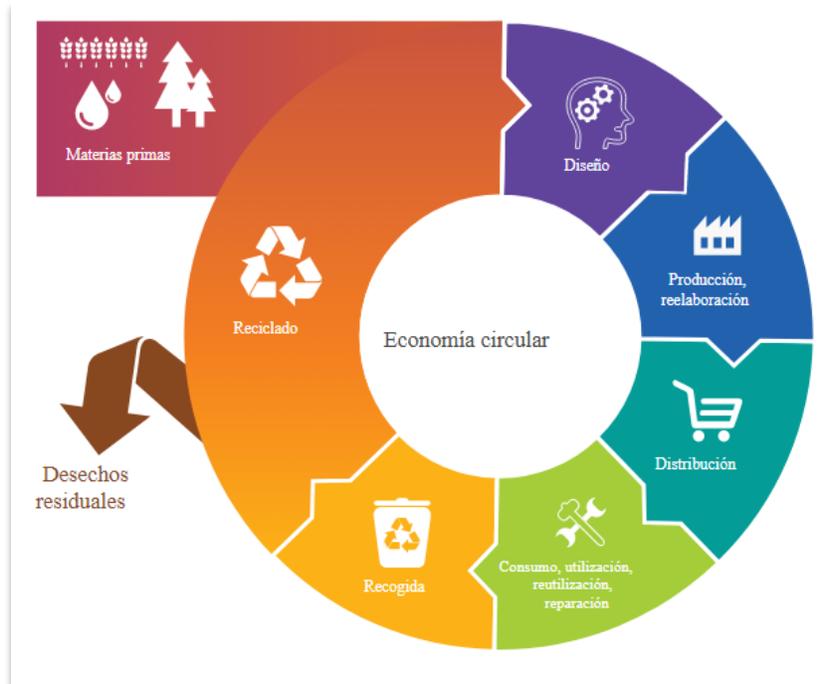


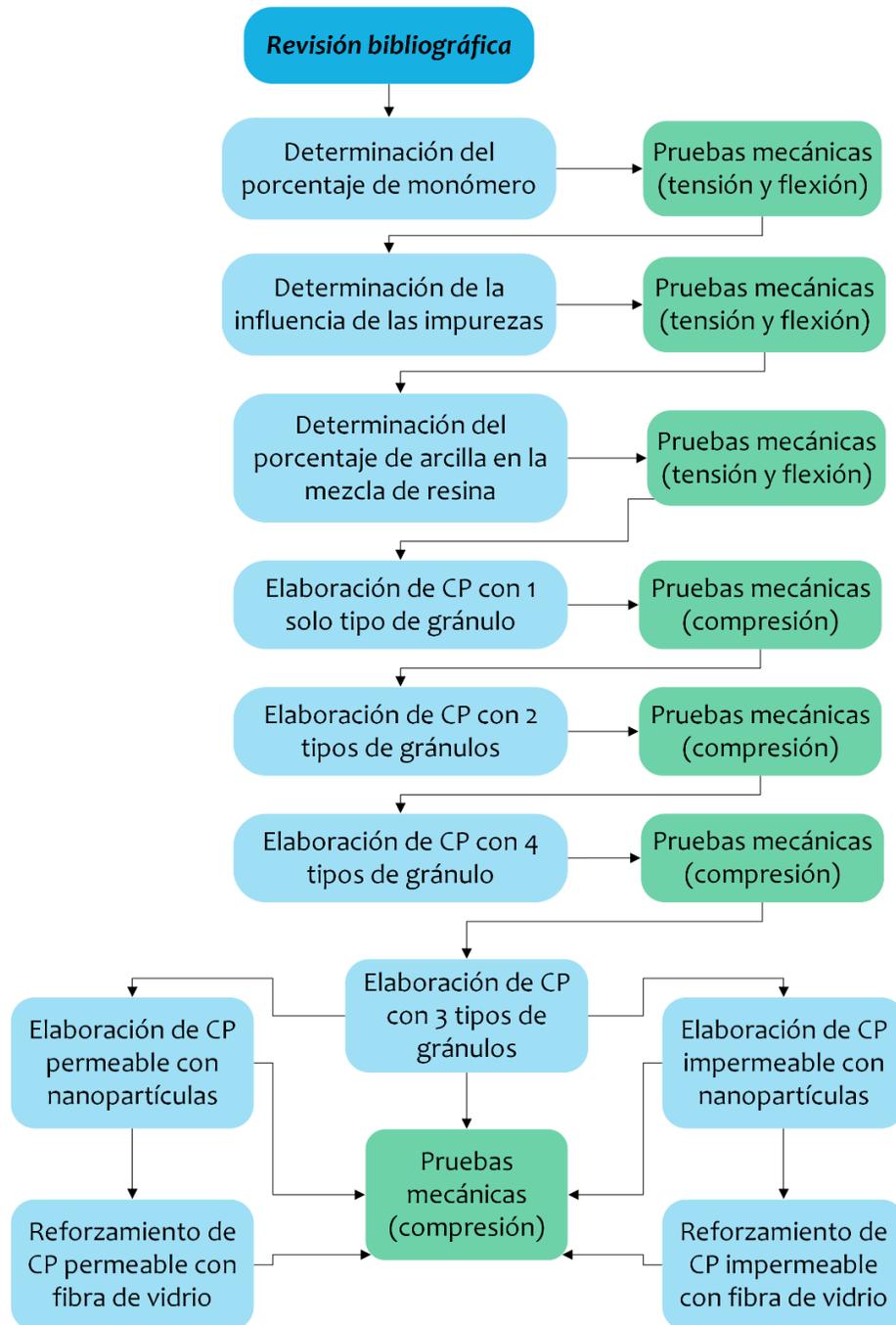
Figura 1.22. Pasos de la economía circular

En concordancia con el cuidado al ambiente y el impulso de la economía circular, así como el cumplimiento de las normas aplicables en la Ciudad de México, el presente trabajo busca desarrollar un concreto polimérico a partir de agregados pétreos provenientes del reciclaje de residuos de la construcción y demolición, así como resina poliéster insaturada derivada del PET de botellas que servirá como aglutinante de dichos agregados, adicionando también arcilla químicamente modificada con L-lisina que previene la degradación de los agregados pétreos.

Capítulo 2. Desarrollo Experimental

2.1 Diagrama de flujo de la metodología empleada

En este capítulo se describe la metodología empleada para el desarrollo del concreto polimérico.



2.2 Materiales

- Arcilla bentonita modificada con L-lisina de la compañía “Nanoplásticos S.A. de C.V”.
- Fibra de vidrio de la compañía “Reaxsol”, cortado en filamentos de 12.7 mm, presentación de 3 kg.
- Gránulos de concreto reciclado de diversos tamaños (arena, 6.4 mm, 9.5 mm y 19.1 mm), de la Compañía ACCUBO SA de CV.
- Molde de silicón para probetas de resina para pruebas de tensión y flexión.
- Monómero de estireno al 99.8% en peso, de la compañía “Poliformas plásticas”, lote AOC0023315-1041, con punto de ebullición de 145°C y punto de inflamación de 31°C. Se utiliza como agente diluyente de resinas de poliéster y vinil éster, así como en la elaboración de plásticos, pinturas, cauchos sintéticos y revestimientos protectores.
- Octoato de Cobalto al 50% en peso, etiquetado como “Cobalto”, de la compañía “Poliformas plásticas”, lote A2011264. Su punto de ebullición es de 205°C su punto de inflamación es de 61°C. Se utiliza como un secante en la industria de pinturas, tintas y resina poliéster.
- Peróxido de metil-etil-cetona al 30-37% en peso, etiquetado como “Catalizador K-2000” de la compañía “Poliformas plásticas”, lote 2011428649. Es un líquido incoloro levemente ácido, descompone a una temperatura por debajo del punto de ebullición. Es utilizado para el curado a temperatura ambiente de resinas poliéster insaturadas y gel coat’s
- Resina poliéster insaturada proveniente de PET reciclado, a través de una reacción de glicólisis, de la Compañía ACCUBO S.A. de C.V.
- Tinta vinílica para serigrafía “Uniplast”, color “rojo vivo” de la marca “Rosas gráficos”. Se utiliza en la impresión de PVC, policarbonato, PET, acrílico, etc.
- Tubos de PVC de 70 mm de diámetro, para preparar los especímenes de concreto polimérico para determinación de propiedad a compresión.
- Vaselina sólida, de la compañía “Poliformas Plásticas” lote 1104287, como desmoldante.

2.3 Equipo

- Balanza Kern modelo ITB 15K0.5IP.
- Determinador del porcentaje de humedad KERN MLB 50-3.
- Espectrofotómetro de Infrarrojo (FTIR) marca Thermo Scientific, modelo Nicolet 6700.
- Horno profesional eléctrico/de convección Garbin Bravo Id. No. 140324.
- Lijadora de banda y disco 4 x 6" de 250 W (1/3 HP), Truper.
- Máquina de pruebas universales INSTRON modelo 8802 para ensayos de compresión concreto, según la norma ASTM C39, a una velocidad de 1 mm/min.
- Máquina de pruebas universales SHIMADZU AGS-X para ensayos de tensión y flexión, según las normas ASTM D638 y ASTM D790, a 5 mm/min y a 3 mm/min, respectivamente.

2.4 Preparación de la arcilla

La modificación superficial de la arcilla se realiza por medio de una reacción de sustitución iónica la cual se describe a continuación:

1. Se pesan entre 10 y 20 kg de arcilla bentonita y se mezclan con un volumen de entre 20 y 40 litros de agua, a una temperatura entre 50 y 70 °C.
2. Se adiciona y se agita vigorosamente hasta que los grumos de arcilla desaparezcan
3. Se vierten de 1 a 2 kg de cloruro del aminoácido L-lisina a la mezcla de agua-arcilla. Se mantiene en agitación vigorosa entre 20 y 80 minutos hasta la disolución de la sal del aminoácido.
4. Se filtra la mezcla y se lava con agua caliente.
5. La arcilla modificada se seca en un horno con vacío a una temperatura entre 60 y 90 °C.
6. Por último, la arcilla se muele hasta la apariencia de talco. (Instituto Mexicano de la Propiedad Intelectual (IMPI) Patente nº 376074. Exp. MX/a/2013/010642, 2020)

2.5 Preparación de la resina poliéster insaturada

La resina poliéster insaturada se produce a partir de botellas de PET postconsumo mediante una reacción de glicolización con propilenglicol y posterior esterificación con anhídrido maleico, de acuerdo con el siguiente procedimiento (Barboza & et.al., 2009):

1. El PET post-consumo se tritura mecánicamente para obtener hojuelas.
2. Las hojuelas de PET se colocan en un reactor junto con el propilenglicol, a una relación de 2:1. Se calienta a una temperatura máxima de 235 °C por 5 horas y a una presión de 0.25 MPa
3. El PET glicolizado se transfiere a otro reactor y se adiciona el anhídrido maléico para la esterificación, usando una relación PET-anhídrido de 1.2:1. Se calienta por 6 horas a 215 °C y una presión de 0.10 MPa.
4. Se adiciona hidroquinona y monómero de estireno, se calienta por 6 horas a 70 °C y una presión máxima de 0.10 MPa.
5. Finalmente se filtra y se obtiene la resina poliéster insaturada.

2.6 Preparación de probetas de resina

2.6.1 Preparación de probetas para determinar el contenido de monómero en la formulación con resina

Para determinar el contenido de monómero de estireno que otorgue las mejores propiedades mecánicas, se elaboran probetas de resina con las siguientes consideraciones:

La preparación de la mezcla para el curado de resina se hace con el siguiente procedimiento:

1. En un recipiente se pesan 200 g de resina poliéster.
2. Se pesan las siguientes cantidades de monómero de acuerdo con la Tabla 2.1:

Tabla 2.1. Cantidad de monómero a variar en cada prueba.

Prueba	Porcentaje de monómero	Cantidad de monómero (g)
1	0 %	0
2	10 %	20
3	20 %	40
4	30 %	60
5	35 %	70
6	40 %	80

3. Se adiciona la cantidad de monómero correspondiente a cada prueba en el recipiente con resina y se homogeniza la mezcla.
4. Se adicionan 8 g de P MEC y nuevamente se agita hasta que la mezcla sea homogénea.
5. Se incorporan 4 g de cobalto, se revuelve hasta que la mezcla sea uniforme y rápidamente se vacía en el molde de silicón para probetas.
6. Se deja curar la resina por al menos 24 horas. Pasado ese tiempo, se desmolda y se rectifican las dimensiones.
7. El tamaño de las probetas debe cumplir las especificaciones de las normas ASTM D638 y D790, descritas en los anexos A y B, respectivamente. En caso de tener exceso de resina en los bordes se retira con ayuda de un cúter o de unas tijeras.
8. Se realizan las pruebas mecánicas de tensión y flexión.



Figura 2.1. Curado de resina en el molde de silicón para formar las probetas

2.6.2 Preparación de probetas para determinar el efecto de las impurezas (tintas) en la polimerización de la resina

Para evaluar el efecto de las impurezas (tintas), se preparan probetas con un procedimiento similar al punto anterior:

1. En un recipiente se pesan 70 g de monómero de estireno.
2. Se pesan cantidades variables de tinta de acuerdo con la Tabla 2.2. y se adiciona al monómero, cuidando que se incorpore totalmente la tinta en el monómero.

Tabla 2.2. Tinta adicionada en cada prueba

Prueba	Porcentaje de tinta respecto a la resina	Cantidad de tinta (g)
1	0.5 %	1
2	1 %	2

3. Se pesan 200 g de resina poliéster y se adiciona al recipiente con monómero.
4. Se adicionan 8 g de P MEC y nuevamente se agita hasta que la mezcla sea homogénea.
5. Se incorporan 4 g de cobalto, se revuelve hasta que la mezcla sea uniforme y rápidamente se vacía en el molde de silicón para probetas.
6. Se deja curar la resina por al menos 24 horas. Pasado ese tiempo, se desmolda y se rectifican las especificaciones de las normas ASTM. En caso de tener exceso de resina en los bordes se retira con ayuda de un cúter o de unas tijeras.
7. Se realizan las pruebas mecánicas de tensión y flexión.

2.6.3 Preparación de probetas para determinar el contenido de arcilla en la formulación con resina

Para conocer el efecto de la arcilla en la polimerización de la resina, nuevamente se sigue el procedimiento para preparar probetas y con las siguientes consideraciones:

1. En primera instancia, se debe asegurar que la arcilla tenga un porcentaje de humedad menor al 3%. Si el porcentaje de humedad es mayor, se deja secar en el horno por 15 minutos a 100 °C. Una vez que se encuentra en el porcentaje de humedad deseado, se puede utilizar para elaborar las probetas.
2. En un recipiente se pesan 200 g de resina poliéster.
3. Para determinar el contenido de arcilla, ésta se debe adicionar a la resina pura antes de agregar los demás ingredientes y en cantidades variables según la Tabla 2.3:

Tabla 2.3. Cantidades de arcilla para cada prueba.

Prueba	Porcentaje de arcilla	Cantidad de arcilla (g)
1	0.5 %	0
2	1 %	2
3	2 %	4
4	3 %	6
5	4 %	8

4. Se pesan 70 g de monómero y se adicionan al recipiente con resina poliéster.
5. Se agregan 8 g de PMEC y nuevamente se agita hasta que la mezcla sea homogénea.
6. Se incorporan 4 g de cobalto, se revuelve hasta que la mezcla sea uniforme y rápidamente se vacía en el molde de silicón para probetas.
7. Se deja curar la resina por al menos 24 horas. Pasado ese tiempo, se desmolda y se rectifican las especificaciones de las normas ASTM. En caso de tener exceso de resina en los bordes se retira con ayuda de un cúter o de unas tijeras.
8. Se realizan las pruebas mecánicas de tensión y flexión.



Figura 2.2. Prueba de tensión para probetas de resina

2.7 Preparación de concreto polimérico

Para este apartado se considera que el concreto consta de dos partes esenciales: la mezcla aglutinante (que es la resina con aditivos para su curado) y los gránulos de concreto reciclado que se mezclan para obtener concreto polimérico.

2.7.1 Propiedades del concreto con un solo tipo de gránulo

Para evaluar el efecto de las diferentes granulometrías en la elaboración de concreto polimérico, se preparan probetas con el siguiente procedimiento:

1. Se llenan varios tubos para probeta (Anexo C) con cada uno de los diferentes gránulos. Se pesa el contenido y se registran las cantidades utilizadas por cada tamaño de gránulo:

Tabla 2.4. Cantidades utilizadas de cada gránulo.

Tamaño del gránulo	Cantidad utilizada (g)
Arena	408.5
6.4 mm	342.0
9.5 mm	324.5
19.1 mm	347.5

2. Para cada gránulo se consideran las siguientes relaciones de resina-gránulos y se calcula la cantidad de mezcla aglutinante necesaria:

Tabla 2.5. Relación resina-gránulos y cantidad de aglutinante necesaria

Tamaño del gránulo	Relación resina-gránulos	Cantidad de mezcla aglutinante utilizada (g)
Arena	1:3	136.1
6.4 mm	1:6	57.0
9.5 mm	1:7	46.3
19.1 mm	1:8	43.4

3. Se prepara la mezcla aglutinante necesaria para cada gránulo siguiendo la relación:

Por cada 141 g de mezcla aglutinante se necesitan 100 g de resina poliéster, 35 g de monómero, 4 g de MEKP y 2 g de cobalto.

4. La mezcla aglutinante se incorpora a los gránulos y se homogeniza hasta que todos los gránulos estén húmedos de aglutinante.
5. Vaciamos a los tubos de PVC previamente preparados y se dejan curar en un lugar totalmente plano.
6. Pasadas 24 horas, se desmoldan y se comprueba que cumplan con las especificaciones de la norma ASTM (anexo D). De no ser así, se deben acondicionar los especímenes adecuadamente. Si las cumplen, se realizan los ensayos de compresión.



Figura 2.3. Gránulos de concreto reciclado. De izquierda a derecha: 9.5 mm, arena y 6.4 mm

2.7.2 Propiedades del concreto con 2 tipos de gránulos

Para evaluar la eficiencia de una mezcla de 2 gránulos, se realizan probetas con el siguiente procedimiento:

1. A tres tubos para probeta (Anexo D), se le agrega el gránulo más pequeño de la mezcla hasta llegar a la mitad. Se pesa la masa de gránulos utilizados y se rellena el tubo con el gránulo más grande. Las cantidades utilizadas para cada mezcla son las siguientes:

Tabla 2.6. Granulados de cada mezcla

Mezcla de gránulos	Masa de cada granulado	Masa total de granulados (g)
Arena – 6.4 mm	Arena: 218.5 g 6.4 mm: 185.3 g	403.8
6.4 mm – 9.5 mm	6.4 mm: 185.3 g 9.5 mm: 173.8 g	359.0
9.5 mm – 19.1 mm	9.5 mm: 173.8 g 19.1 mm: 209.0 g	382.0

2. Con la masa de gránulos total y la relación de resina-gránulos, obtenemos la mezcla aglutinante necesaria para cada probeta:

Tabla 2.7. Relación resina-gránulos y mezcla aglutinante necesaria

Mezcla de gránulos	Relación resina-gránulos	Mezcla aglutinante utilizada (g)
Arena – 6.4 mm	1:3	143.5
6.4 mm – 9.5 mm	1:4	89.0
9.5 mm – 19.1 mm	1:4	87.0

3. Obtenida la cantidad de mezcla aglutinante necesaria, se prepara y se incorpora a la mezcla de gránulos.
4. Vaciamos a los tubos de PVC previamente preparados y se dejan curar en un lugar totalmente plano.
5. Después de 24 horas, se desmoldan y se comprueba que los especímenes cumplan con las especificaciones de la norma (anexo D). Si las cumplen, se realizan los ensayos de compresión.

2.7.3 Propiedades del concreto con 4 tipos de gránulos

Se preparan probetas de concreto con los 4 tipos de gránulos, con el fin de evaluar la eficiencia de una mezcla de 4 tipos de gránulos, así como el efecto de la relación resina-gránulos. Se realizan con el siguiente procedimiento:

1. Se preparan 2.5 kg de una mezcla con los 4 gránulos usando las siguientes cantidades de cada uno:

Tabla 2.8. Porcentaje de cada gránulo en la mezcla 4 gránulos

Granulado	Masa de granulado (g)	Porcentaje en la formulación (%)
Arena	526.3	21.05
6.4 mm	526.3	21.05
9.5 mm	789.5	31.58
19.1 mm	657.9	26.31

2. Se llenan tubos de PVC para probetas con las siguientes cantidades de la mezcla de gránulos:

Tabla 2.9. Masa de mezcla de 4 granulados para cada tubo

Tubo	Masa de gránulos (g)
1	453.5
2	455.0
3	453.5
4	450.5
5	454.0

3. Con base en la masa de gránulos en cada tubo y la relación de resina-gránulos propuesta, obtenemos la mezcla aglutinante necesaria para cada probeta:

Tabla 2.10. Mezcla aglutinante para probetas de 4 gránulos

Tubo	Relación resina-gránulos	Mezcla aglutinante utilizada (g)
1	1:4	113.4
2	1:5	91.0
3	1:6	75.6
4	1:7	64.4
5	1:8	56.8

4. Obtenida la cantidad de mezcla aglutinante necesaria, se prepara y se incorpora a la mezcla de gránulos.
5. Vaciamos a los tubos de PVC previamente preparados y se dejan curar en un lugar totalmente plano.
6. Después de 24 horas, se desmoldan y se comprueba que los especímenes cumplan con las especificaciones de la norma (anexo D). De no ser así, se deben de preparar los especímenes adecuadamente. Si las cumplen, se realizan los ensayos de compresión.



Figura 2.4. Llenado de los tubos para probetas de concreto

2.7.4 Elaboración de concreto permeable con 3 tipos de gránulos

Se preparan probetas de concreto con 3 tipos de gránulos, con el fin de evaluar la eficiencia de la mezcla, así como el efecto de la relación resina-gránulos. Se realizan con el siguiente procedimiento:

1. Se prepara una mezcla de 2 kg con los 3 gránulos usando las siguientes cantidades:

Tabla 2.11. Porcentaje de cada gránulo en mezcla de 3 gránulos

Granulado	Masa de granulado (g)	Porcentaje en la formulación (%)
Arena	571.4	28.57
6.4 mm	714.3	35.71
9.5 mm	714.3	35.71

2. Se llenan tubos de PVC con las siguientes cantidades de gránulos

Tabla 2.12. Masa de mezcla de 3 gránulos por cada tubo

Tubo	Masa de gránulos (g)
1	423.0
2	420.5
3	431.5
4	422.5
5	421.0

3. Con base en la masa de gránulos en cada tubo y la relación de resina-gránulos propuesta, obtenemos la mezcla aglutinante necesaria para cada probeta:

Tabla 2.13. Mezcla aglutinante para probetas de 3 gránulos

Probeta	Relación resina-gránulos	Mezcla aglutinante utilizada (g)
1	1:4	105.7
2	1:5	84.0
3	1:6	72.0
4	1:7	62.0
5	1:8	53.5

4. Obtenida la cantidad de mezcla aglutinante necesaria, se prepara y se incorpora a la mezcla de gránulos.
5. Vaciamos a los tubos de PVC previamente preparados y se dejan curar en un lugar totalmente plano.
6. Después de 24 horas, se desmoldan y se comprueba que los especímenes cumplan con las especificaciones de la norma (anexo D). De no ser así, se debe acondicionar los especímenes adecuadamente. Si las cumplen, se realizan los ensayos de compresión.

2.7.5 Elaboración de concreto permeable con nanopartículas

Para adicionar las nanopartículas a un concreto permeable, se elaboran 3 probetas con el siguiente procedimiento:

1. En un recipiente se pesan 1350 g de mezcla con 3 gránulos usando las siguientes cantidades de cada uno:

Tabla 2.14. Gránulos necesarios para 3 probetas de concreto permeable

Granulado	Masa de granulado (g)
Arena	386.0
6.4 mm	482.0
9.5 mm	482.0

- Usando una relación resina-gránulos de 1:4, se preparan 337.5 g de mezcla aglutinante siguiendo la relación de resina curada:

Tabla 2.15. Reactivos necesarios para la mezcla aglutinante de concreto permeable con nanopartículas

Reactivo	Relación de resina curada	Gramos necesarios para probetas de concreto
Resina poliéster	100 g	236.0 g
Monómero de estireno	35 g	82.6 g
PMEC	4 g	9.4 g
Cobalto	2 g	4.7 g
Arcilla	2 g	4.7 g

- Se pesa la resina poliéster, se adiciona la arcilla y se mezcla perfectamente.
- Se adicionan los demás reactivos de la mezcla aglutinante, se homogeniza y se incorpora a la mezcla de gránulos.
- Vaciamos a 3 tubos de PVC previamente preparados y se dejan curar en un lugar totalmente plano.
- Después de 24 horas, se desmoldan y se comprueba que los especímenes cumplan con las especificaciones de la norma (anexo D). De no ser así, se debe acondicionar los especímenes adecuadamente. Si las cumplen, se realizan los ensayos de compresión.



Figura 2.5. Ensayo de compresión de concreto permeable

2.7.6 Elaboración de concreto impermeable con 3 tipos de gránulos

Para elaborar las probetas con concreto impermeable se siguió el procedimiento que se muestra a continuación:

1. Partiendo de la mezcla de 3 gránulos del apartado anterior (Tabla 2.14) se pesan nuevamente esas cantidades y se distribuyen los gránulos en 3 tubos para probetas.
2. Se pesa cada tubo lleno y se registra.
3. En seguida, a cada tubo se le adiciona arena con el fin de rellenar los huecos que hay entre los gránulos más grandes.
4. Nuevamente se pesa cada tubo y se obtiene por diferencia la cantidad de arena adicionada a cada tubo.

Tabla 2.16. Peso de los tubos antes y después de la arena adicional

Tubo	Peso antes de la arena adicional	Peso después de la arena adicional	Arena adicional (g)
1	514.5 g	651.5 g	137
2	513.0 g	648.0 g	135
3	514.0 g	650.0 g	136

5. Debido a que esta arena adicional generará que los tubos con la mezcla de resina y gránulos se desborden, ahora solo se consideraran 503 g de gránulos (mezcla de 3 gránulos) por cada tubo.
6. En un recipiente se pesan 1509 g de mezcla con 3 gránulos usando las siguientes cantidades de cada uno:

Tabla 2.17. Gránulos necesarios para 3 probetas de concreto impermeable

Granulado	Masa de granulado (g)
Arena	681.0
6.4 mm	414.0
9.5 mm	414.0

7. Usando una relación resina-gránulos de 1:3, se preparan 503 g de mezcla aglutinante partiendo de la relación de resina curada:

Tabla 2.18. Reactivos necesarios para la mezcla aglutinante de concreto impermeable

Reactivo	Relación de resina curada	Gramos necesarios para probetas de concreto
Resina poliéster	100 g	351.7 g
Monómero de estireno	35 g	123.1 g
PMEC	4 g	14.1 g
Cobalto	2 g	7.0 g

8. Obtenida la cantidad de cada reactivo para la mezcla aglutinante, se prepara y se incorpora a la mezcla de gránulos.
9. Vaciamos a los tubos de PVC previamente preparados y se dejan curar en un lugar totalmente plano.
10. Después de 24 horas, se desmoldan y se comprueba que los especímenes cumplan con las especificaciones de la norma (anexo D). De no ser así, se debe acondicionar los especímenes adecuadamente. Si las cumplen, se realizan los ensayos de compresión.

2.7.7. Elaboración de concreto impermeable con nanopartículas

1. En un recipiente se pesan 1509 g de la mezcla de 3 gránulos indicada en el apartado anterior.
2. Usando una relación resina-gránulos de 1:3, se preparan 503 g de mezcla aglutinante partiendo de la relación de resina curada, considerando ahora la arcilla y recordando que ésta se agrega a la resina poliéster antes que los otros reactivos:

Tabla 2.19. Reactivos necesarios para la mezcla aglutinante de concreto impermeable con nanopartículas

Reactivo	Relación de resina curada	Gramos necesarios para probetas de concreto
Resina poliéster	100 g	351.7 g
Monómero de estireno	35 g	123.1 g
PMEC	4 g	14.1 g
Cobalto	2 g	7.0 g
Arcilla	2 g	7.0 g

3. Obtenida la cantidad de cada reactivo para la mezcla aglutinante, se prepara y se incorpora a la mezcla de gránulos.
4. Vaciamos a los tubos de PVC previamente preparados y se dejan curar en un lugar totalmente plano.
5. Después de 24 horas, se desmoldan y se comprueba que los especímenes cumplan con las especificaciones de la norma (anexo D). De no ser así, se debe acondicionar los especímenes adecuadamente. Si las cumplen, se realizan los ensayos de compresión.



Figura 2.6. Probeta de concreto impermeable antes (izquierda) y después (derecha) del ensayo de compresión

2.7.8 Elaboración de concreto reforzado con fibra de vidrio

En este apartado se realizan dos pruebas para evaluar el efecto de la fibra de vidrio en cada concreto (permeable e impermeable). Para cada caso, se elaboran las probetas siguiendo el mismo procedimiento de los apartados anteriores (2.7.5 para el concreto permeable y 2.7.7 para el impermeable), solo se debe considerar que la fibra de vidrio se adiciona a los gránulos antes de verter la mezcla aglutinante. Para cada prueba se adicionan las siguientes cantidades de fibra:

Tabla 2.20. Fibra de vidrio para cada prueba

Concreto	Prueba	Porcentaje de fibra de vidrio (%)	Gramos de fibra (g)
Permeable	1	1	2.4
Permeable	2	2	4.7
Impermeable	3	1	3.5
Impermeable	4	2	7.0

Capítulo 3. Resultados y Discusión

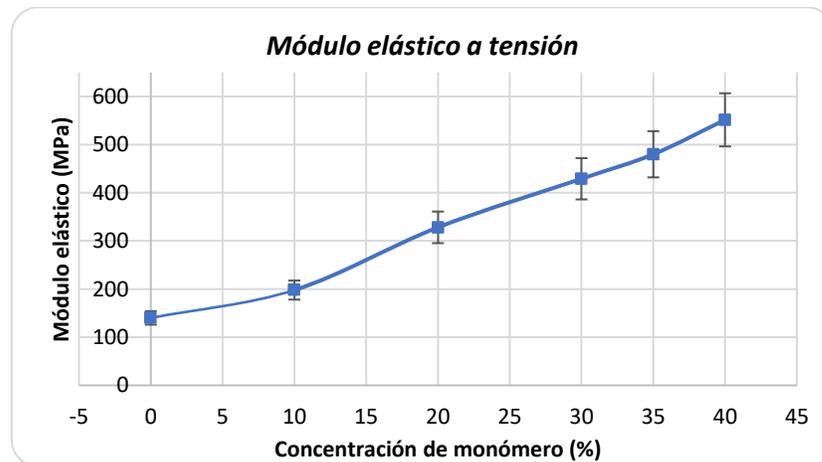
En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de haber evaluado diversos factores que afectan el curado de la resina poliéster; así mismo, se presenta la resistencia a la compresión que tuvieron los diversos concretos elaborados y se selecciona el de mejores propiedades mecánicas.

3.1 Efecto del contenido de monómero para el entrecruzamiento

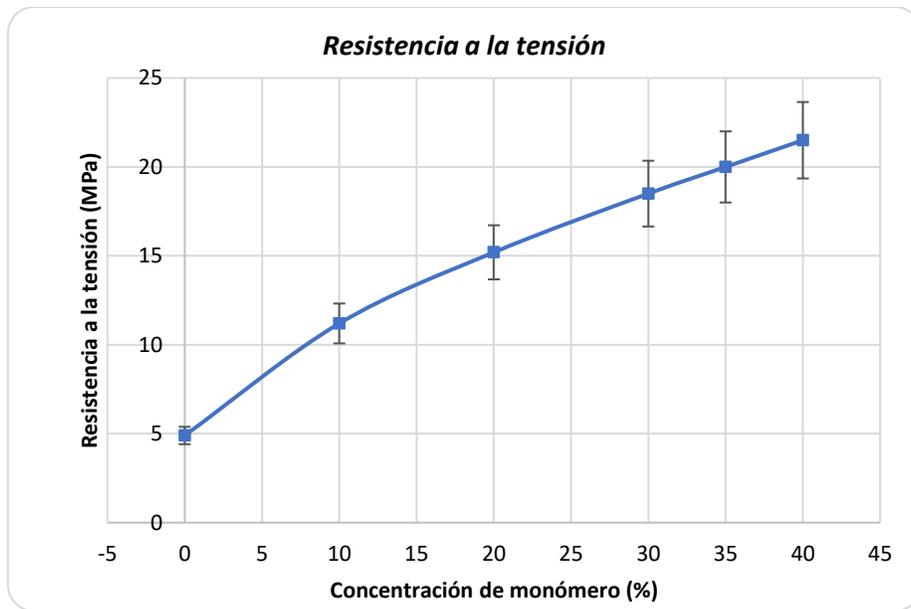
Para poder determinar la concentración de monómero de estireno en el curado de la resina poliéster insaturada que otorgue las mejores propiedades mecánicas, se hicieron probetas que luego fueron sometidas a pruebas de tensión y flexión. A continuación, se muestran los resultados:

Tabla 3.1. Propiedades mecánicas a la tensión en función del monómero

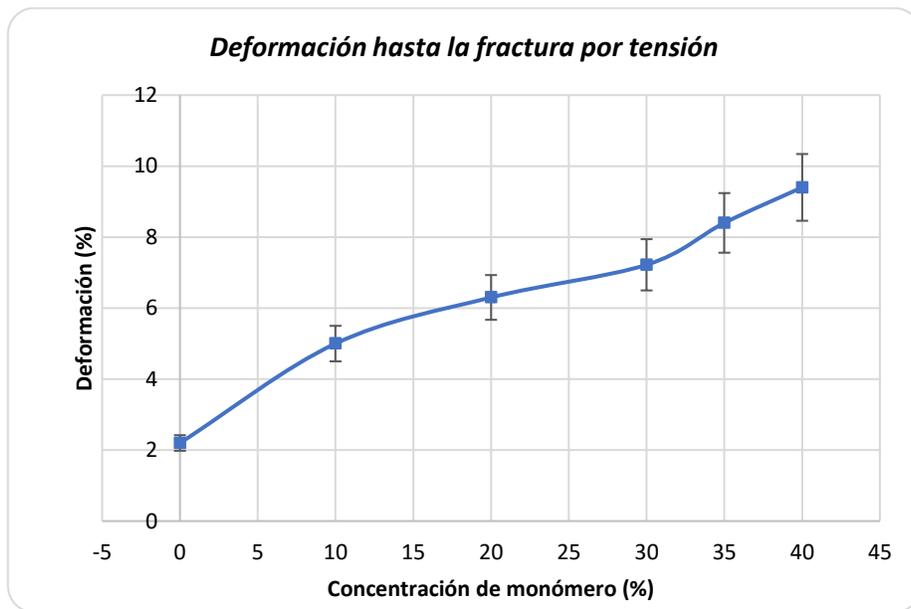
Concentración de monómero (%)	Módulo elástico (MPa)	Resistencia a la tensión (MPa)	Deformación hasta la fractura (%)
0	140	4.9	2.2
10	198	11.2	5.0
20	328	15.2	6.3
30	429	18.5	7.2
35	480	20.0	8.4
40	552	21.5	9.4



Gráfica 1. Módulo elástico a tensión en función de la concentración de monómero



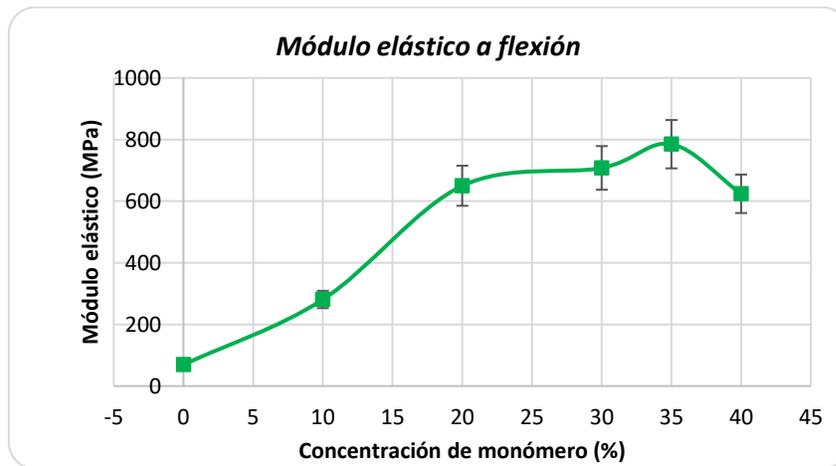
Gráfica 2. Resistencia a la tensión en función de la concentración de monómero



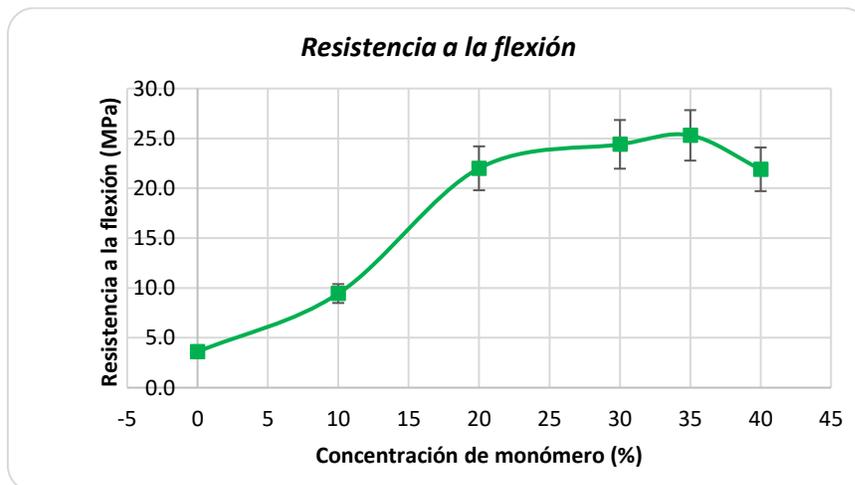
Gráfica 3. Deformación hasta la fractura por tensión en función de la concentración de monómero

Tabla 3.2. Propiedades mecánicas a la flexión en función del monómero

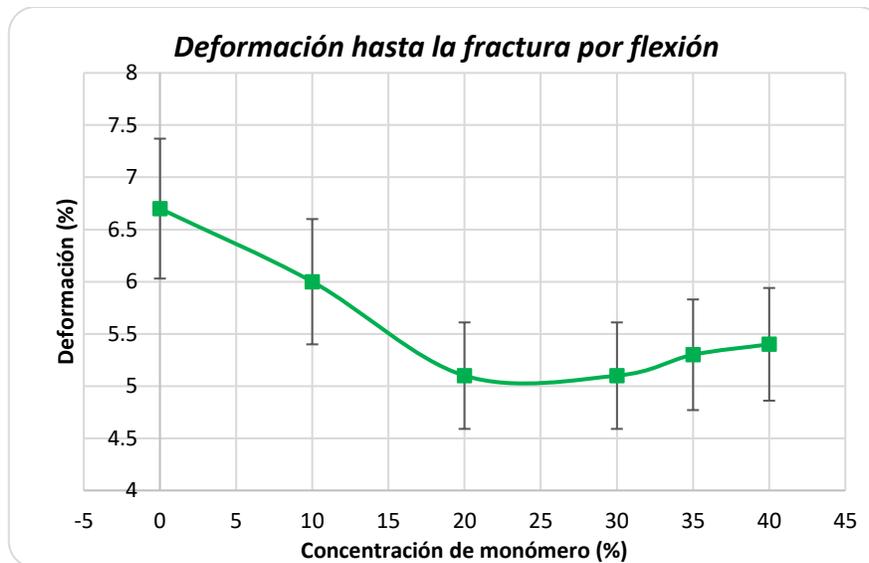
Concentración de monómero (%)	Módulo elástico (MPa)	Resistencia a la flexión (MPa)	Deformación hasta la fractura (%)
0	69	3.6	6.7
10	281	9.4	6.0
20	650	22.0	5.1
30	708	24.4	5.1
35	785	25.3	5.3
40	624	21.9	5.4



Gráfica 4. Módulo elástico a flexión en función de la concentración de monómero



Gráfica 5. Resistencia a la flexión en función de la concentración de monómero



Gráfica 6. Deformación hasta la fractura por flexión en función de la concentración de monómero

Tensión: Como podemos ver en la gráfica 1, los resultados indican que la resina curada adquiere un mayor módulo elástico según aumenta la concentración de monómero, ya que sin monómero apenas se alcanzan 140 MPa, mientras que a una concentración de 40 % se alcanzan hasta 551.5 MPa. De la misma manera, los resultados presentados en la gráfica 2 muestran que la resistencia a la tensión sigue la tendencia anterior y aumenta según la concentración de monómero. Este hecho se confirma con los resultados que se muestran en la gráfica 3, donde se observa una mayor deformación cuando hay más monómero. Con esto, se afirma que el monómero aumenta en gran manera a las propiedades mecánicas cuando la resina curada se somete a esfuerzos de tensión

Flexión: De acuerdo con los resultados de la gráfica 4, en la prueba de flexión se observa un incremento del módulo según aumenta la concentración de monómero; sin embargo, solo alcanza a llegar hasta un máximo de 785 MPa cuando la resina tiene una concentración de 35 % de monómero, seguido de esto se presenta un descenso a 624 MPa con una concentración del 40 %. De la gráfica 5 podemos extraer que la tendencia es la misma: la resina curada alcanza su mayor resistencia a la flexión con un 35 % de monómero, ya que si, aumentamos la concentración, la resistencia desciende de 25.3 MPa a 21.9 MPa.

Respecto a los resultados de la gráfica 6 notamos un descenso generalizado si se aumenta la concentración de monómero, indicando que el aumento de monómero en el curado genera una menor deformación hasta la fractura en pruebas de flexión.

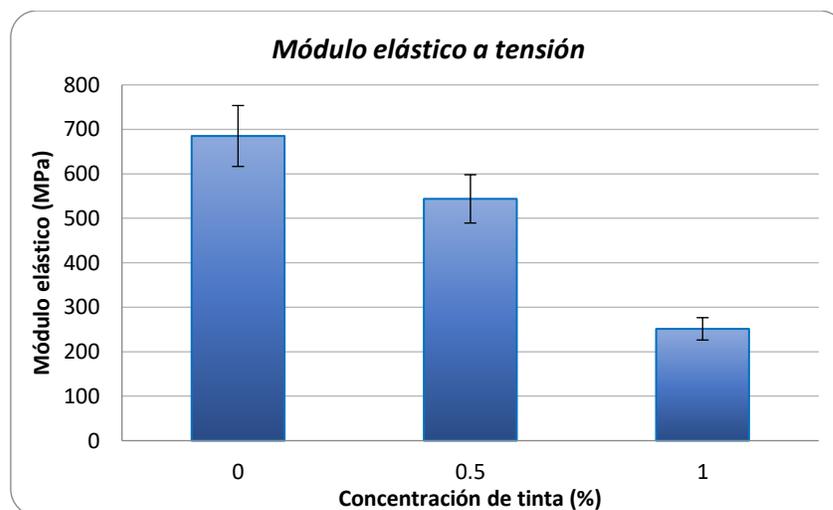
En síntesis, las mejores propiedades de la resina curada se obtienen cuando el monómero se encuentra en una concentración del **35 %**, ya que si bien el aumento de éste genera un material que resiste mejor a los esfuerzos de tensión, también trae consigo un material menos flexible (en términos generales), por lo que el 35 % representa la mejor opción.

3.2 Efecto del contenido de impurezas (tintas)

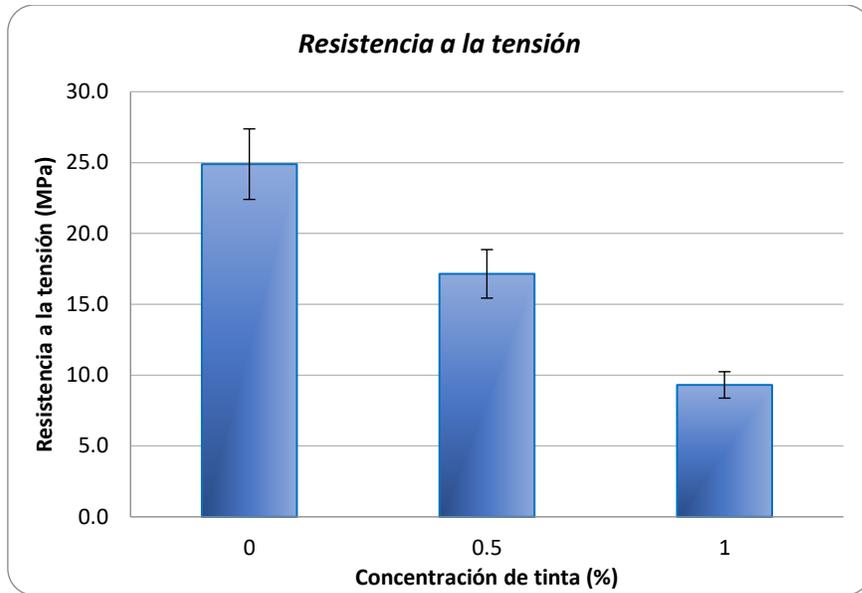
Para evaluar el efecto de las impurezas en la resina, se presentan los siguientes resultados de las pruebas mecánicas:

Tabla 3.3. Propiedades mecánicas a la tensión en función de la tinta

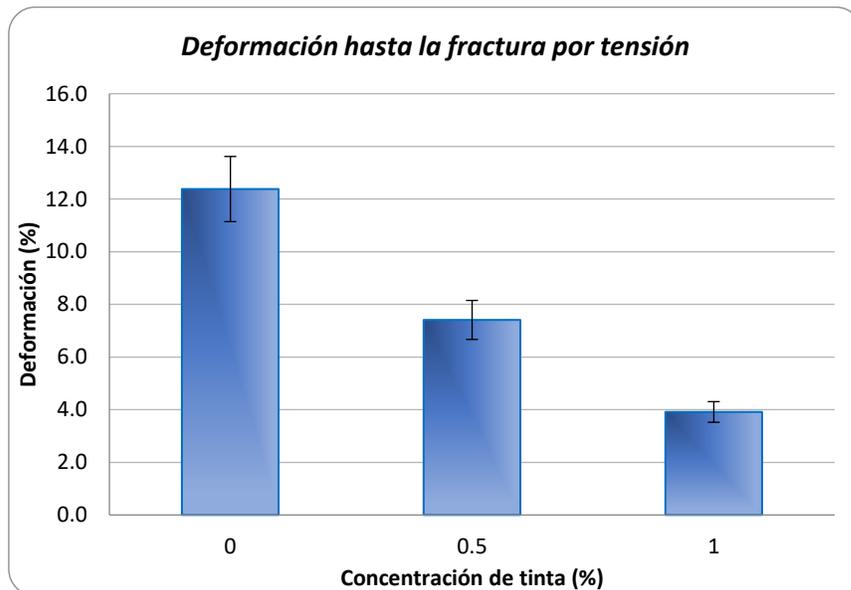
Concentración de tinta (%)	Módulo elástico (MPa)	Resistencia a la tensión (MPa)	Deformación hasta la fractura (%)
0	685	24.9	12.4
0.5	544	17.1	7.4
1	251	9.3	3.9



Gráfica 7. Módulo elástico a tensión en función de la concentración de colorante



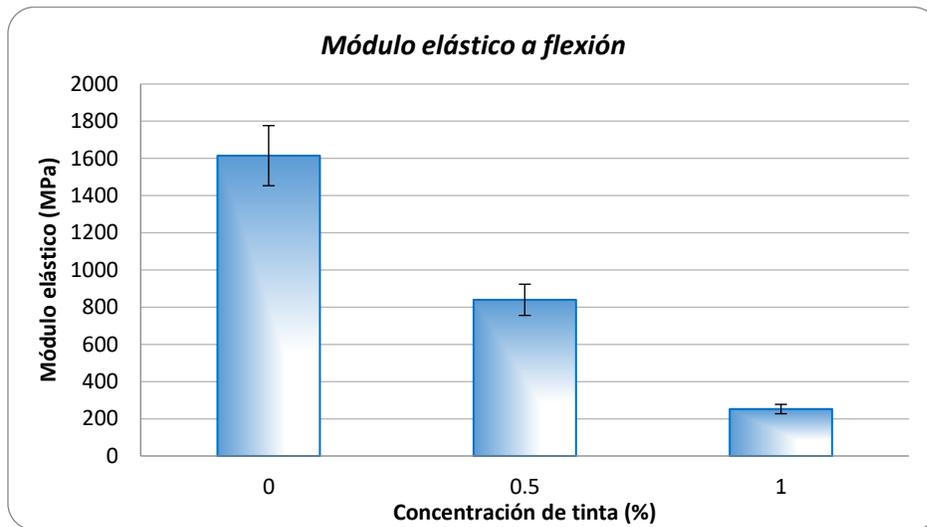
Gráfica 8. Resistencia a la tensión en función de la concentración de colorante



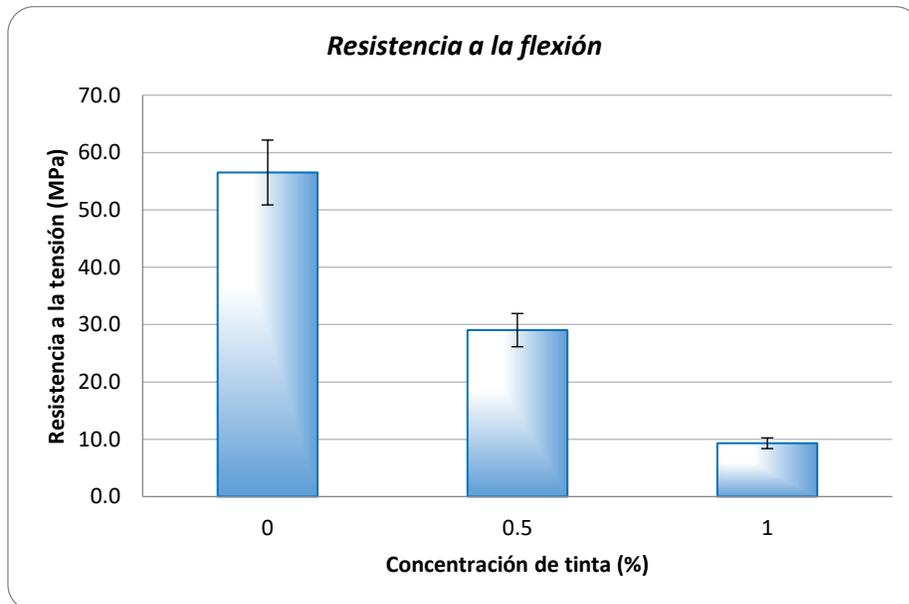
Gráfica 9. Deformación por tensión hasta la fractura en función de la concentración de colorante

Tabla 3.4. Propiedades mecánicas a la flexión en función de la tinta

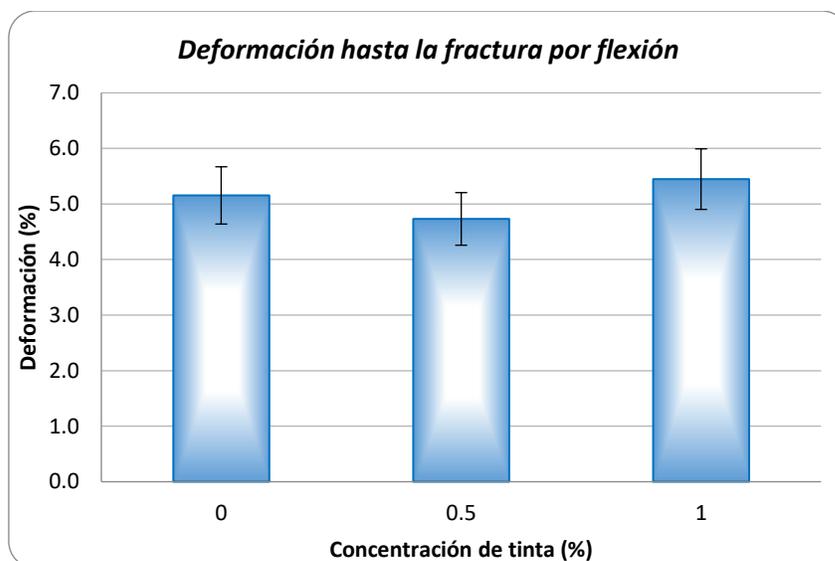
Concentración de tinta (%)	Módulo elástico (MPa)	Resistencia a la flexión (MPa)	Deformación hasta la fractura (%)
0	1615	56.5	5.2
0.5	840	29.0	4.7
1	252	9.3	5.4



Gráfica 10. Módulo elástico a flexión en función de la concentración de tinta



Gráfica 11. Resistencia a la flexión en función de la concentración de tinta



Gráfica 12. Deformación hasta la fractura por flexión en función de la concentración de colorante

Tensión: De acuerdo con las gráficas 7, 8 y 9 podemos notar que las propiedades mecánicas van en descenso según se aumenta la presencia de impurezas. De la Tabla 3.3 notamos que el módulo elástico desciende hasta 251.4 MPa con 1 % de tinta, mientras que sin ella se tiene un módulo elástico de 685.1 MPa. También, vemos que la resistencia a la tensión baja hasta 9.3 MPa, mientras que la deformación a la fractura alcanza su valor más bajo en un 3.9 %, ambas con un 1 % de tinta.

Flexión: Al igual que en las pruebas de tensión, en los ensayos de flexión se nota una baja generalizada de las propiedades mecánicas. De acuerdo con la Tabla 3.4, el módulo elástico baja hasta 252 MPa, la resistencia a la flexión alcanza su valor más bajo con 9.3 MPa y, de forma peculiar, en la deformación hasta la fractura se alcanza el valor mínimo con solo 0.5 % de tinta.

Resumiendo, podemos afirmar que la presencia de impurezas en la resina y, específicamente en su curado, genera una baja considerable de las propiedades mecánicas. Incluso, esto es evidente desde el momento en que elaboramos las probetas para pruebas mecánicas, ya que la tinta no se logró integrar totalmente en la mezcla; también, el curado de las probetas fue menos eficiente cuando se adicionó 1 % de tinta, ya que los especímenes mostraban irregularidades y huecos en la superficie.

El hecho de evaluar el efecto de las tintas sobre las propiedades mecánicas se debe justamente a la procedencia de la resina poliéster, ya que por su origen (PET de botellas post consumo) es muy probable que se presenten algunas impurezas en la resina y esto ocasiona que las propiedades mecánicas se vean afectadas en gran manera, por ello se recomienda que se elimine, en la medida de lo posible, la tinta que las botellas de PET pudieran llegar a tener.



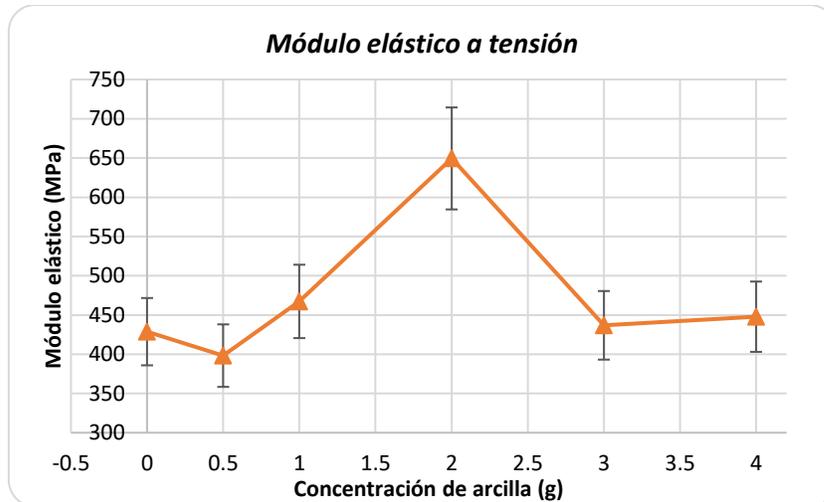
Figura 3.1. Probetas de resina con 0 %, 0.5 % y 1 % de tinta (de izquierda a derecha)

3.3 Efecto de la arcilla en el curado de la resina

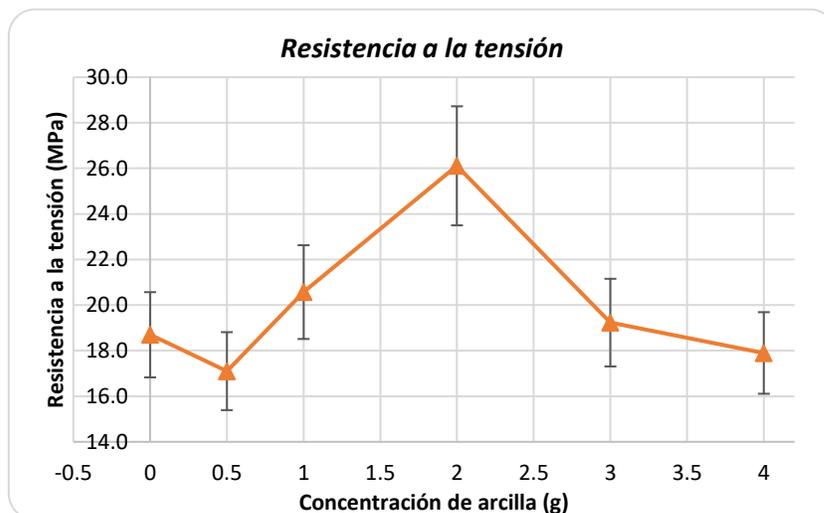
Para evaluar el uso de arcilla modificada, se prepararon probetas de resina con arcilla y se sometieron a pruebas mecánicas. Los resultados obtenidos de dichas pruebas son los siguientes

Tabla 3.5. Propiedades mecánicas a tensión en función de la arcilla

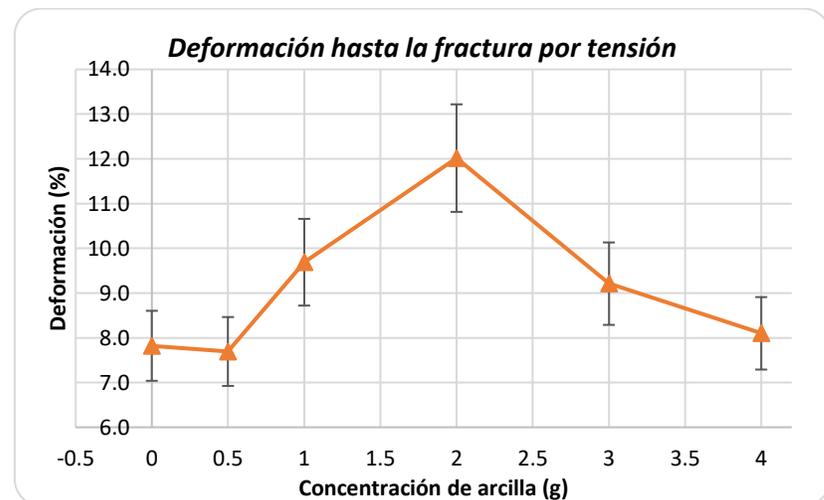
Concentración de arcilla (%)	Módulo elástico (MPa)	Resistencia a la tensión (MPa)	Deformación hasta la fractura (%)
0	429	18.7	7.8
0.5	398	17.1	7.7
1	467	20.6	9.7
2	649	26.1	12.0
3	437	19.2	9.2
4	448	17.9	8.1



Gráfica 13. Módulo elástico a tensión en función de la concentración de arcilla



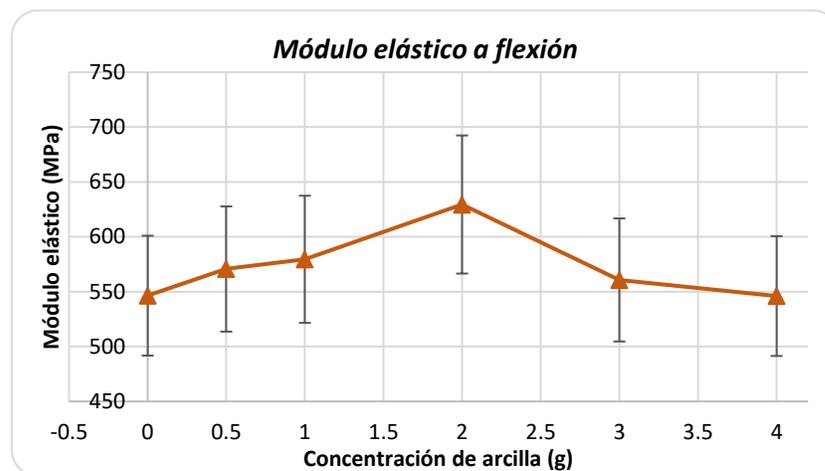
Gráfica 14. Resistencia a la tensión en función de la concentración de arcilla



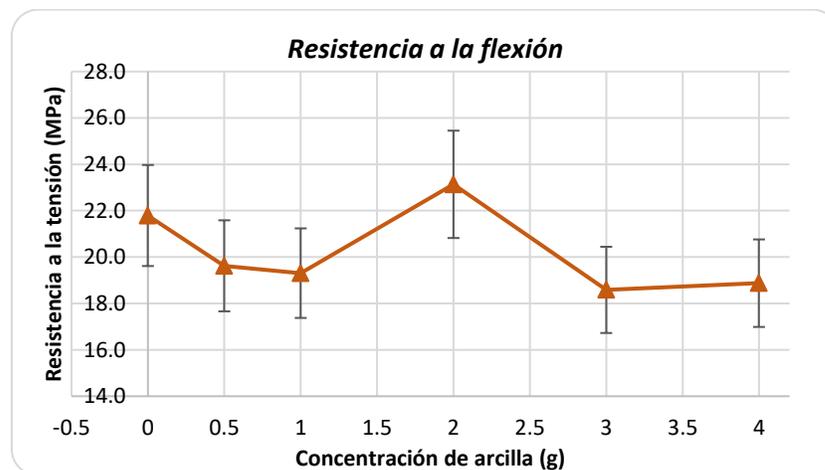
Gráfica 15. Deformación por tensión hasta la fractura en función de la concentración de arcilla

Tabla 3.6. Propiedades mecánicas a flexión en función de la arcilla

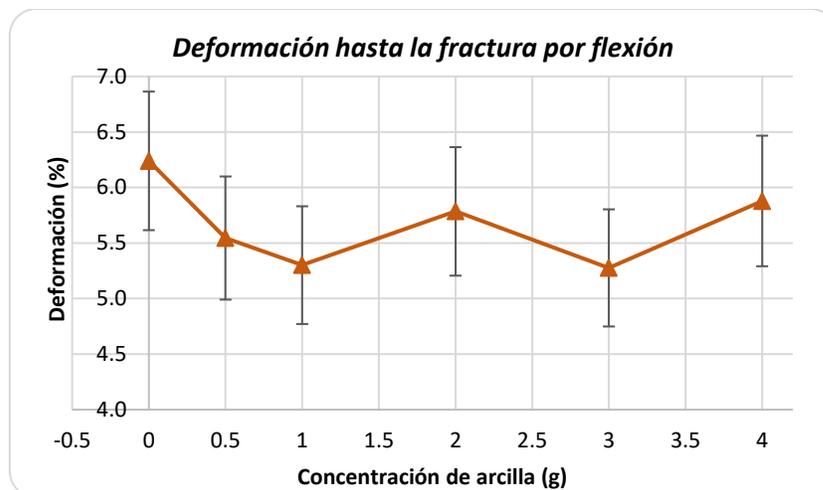
Concentración de arcilla (%)	Módulo elástico (MPa)	Resistencia a la flexión (MPa)	Deformación hasta la fractura (%)
0	546	21.8	6.2
0.5	571	19.6	5.5
1	579	19.3	5.3
2	629	23.1	5.8
3	561	18.6	5.3
4	546	18.9	5.9



Gráfica 16. Módulo elástico a flexión en función de la concentración de arcilla



Gráfica 17. Resistencia a la flexión en función de la concentración de arcilla



Gráfica 18. Deformación hasta la fractura por flexión en función de la concentración de arcilla

Tensión: De las gráficas 13, 14 y 15 notamos que las propiedades alcanzan un pico máximo y enseguida vuelven a bajar. Por ejemplo, el módulo elástico se ubica en 428.7 MPa sin el uso de arcilla, pero este se eleva hasta 649.5 MPa cuando se usa un 2% de arcilla. Del mismo modo, la resistencia a la tracción pasa de 18.7 MPa de la hasta 26.1 MPa con la adición de arcilla a la misma concentración. También la deformación hasta la fractura presenta ese pico, ya que pasa de 7.8 % hasta 12 %.

Flexión: Como bien se mencionó anteriormente, los resultados de las pruebas de flexión muestran la misma tendencia: se llega a un máximo de las propiedades si se usa el 2 % de arcilla y descienden a concentraciones mayores. El módulo elástico alcanza hasta 629.4 MPa, la resistencia a la flexión se eleva de 21.8 a 23.1 MPa y la deformación a la fractura desciende ligeramente de 6.2 a 5.8 %.

Estas observaciones claramente indican que la adición de arcilla a la resina poliéster otorga mejores resultados respecto a la resina curada sin arcilla. Se hace evidente que con una concentración de 2% de arcilla la resina se hace más rígida y aumenta su resistencia a los esfuerzos.

3.4 Evaluación de la resistencia a la compresión de concreto polimérico

En el desarrollo de un concreto permeable y uno impermeable se siguieron diversos pasos, con el fin de hallar la mezcla que otorgue mejores propiedades mecánicas;

además, se adicionó arcilla bentonita reforzada químicamente con L-lisina, que refuerza la resistencia a la compresión del concreto. También se agregó fibra de vidrio que eleva aún más la resistencia del concreto.

A continuación, se presentan los datos obtenidos en cada etapa.

3.4.1 Concreto con un solo tipo de gránulo

Como primer paso se evaluó la resistencia del concreto con un solo tipo de gránulo. Para obtener la resistencia a la compresión se utiliza el siguiente procedimiento:

Debido a que los tubos de PVC utilizados tienen un diámetro $d=7\text{ cm}$, se calcula la sección transversal del cilindro (A) de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$A = \frac{\pi * d^2}{4} = \frac{\pi * (7\text{ cm})^2}{4} = 38.48\text{ cm}^2$$

Con el área de la sección transversal podemos obtener la resistencia a la compresión (S) dividiendo la carga máxima (P) entre el área transversal (A):

$$S = \frac{P}{A} [=] \frac{[kg_f]}{[cm^2]}$$

Por ejemplo, para el concreto hecho solo de arena (Tabla 3.7) se alcanzó una carga máxima de 9980.0 kg_f (kilogramos-fuerza), por lo que la resistencia a la compresión es:

$$S = \frac{9980.0\text{ kg}_f}{38.48\text{ cm}^2} = 259.3 \frac{\text{kg}_f}{\text{cm}^2}$$

Sin embargo, la norma indica que se debe multiplicar por un factor de corrección, según la relación longitud-diámetro (L/D). En el caso de nuestros tubos, la relación L/D es la siguiente:

$$\frac{L}{D} = \frac{90\text{ cm}}{70\text{ cm}} = 1.29$$

La norma indica que si la relación longitud-diámetro es mayor a 1.25 y menor a 1.50, el factor de corrección será de 0.93, por lo que la resistencia a la compresión en cada caso debe multiplicarse por dicho factor de corrección; además, debe ser expresada

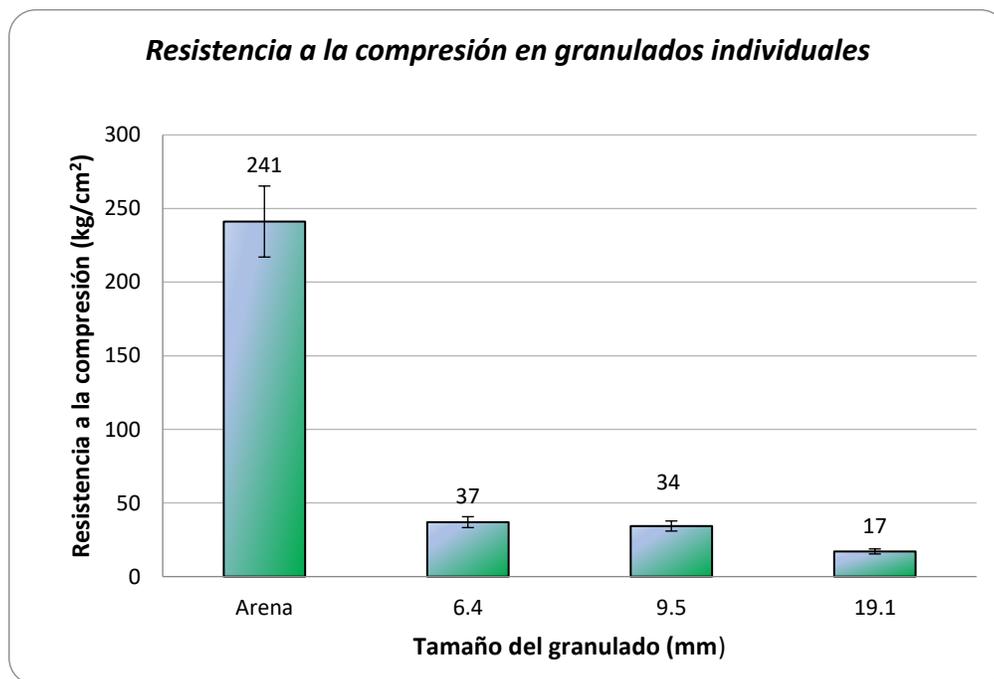
en valores de 1 kgf/cm² por lo que, en nuestro ejemplo anterior, la resistencia del concreto hecho solo con arena es:

$$S_{\text{corregida}} = S * 0.93 = 259.3 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} * 0.93 = 241 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

La resistencia a la compresión corregida de cada muestra es la siguiente:

Tabla 3.7. Carga máxima y resistencia a la compresión calculada para concretos de un solo gránulo

Tamaño del gránulo	Carga máxima (kgf)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)
Arena	9980.0	241
6.4 mm	1530.5	37
9.5 mm	1420.8	34
19.1 mm	706.4	17



Gráfica 19. Resistencia a la compresión de concreto con un solo gránulo

Como podemos ver, el mejor concreto se obtiene con la arena, debido a que no quedan huecos y se hace una mezcla totalmente homogénea junto a la resina aglutinante. En contraparte, el concreto con gránulos de 19.1 mm tiene una pobre resistencia a la compresión, justamente porque se obtiene un concreto muy poroso, pero con poca adherencia de los gránulos. Los gránulos restantes no generaron un concreto con demasiada resistencia, pero tampoco presentaron un valor tan bajo como con el granulado más grande.

3.4.2 Concreto con 2 tipos de gránulos

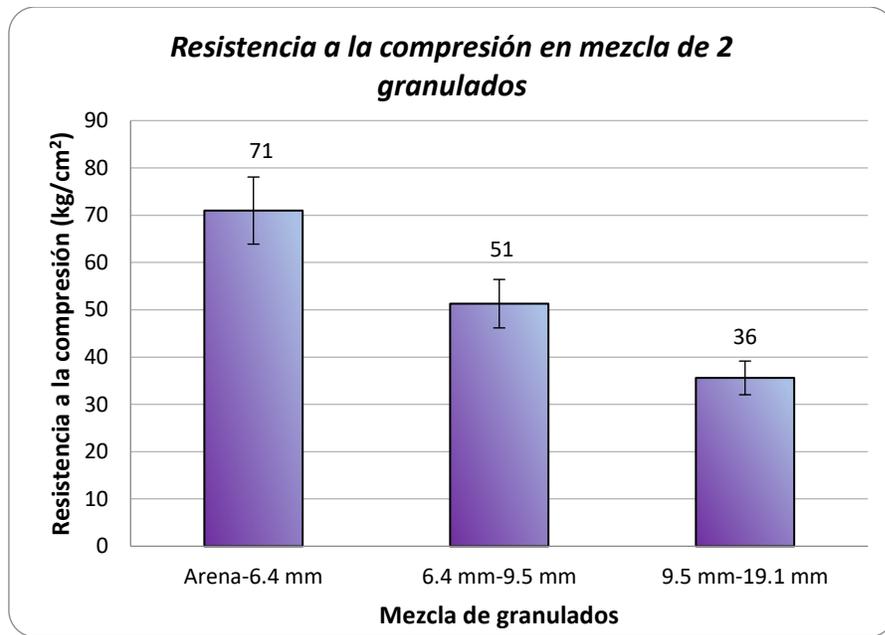
Debido a la gran diferencia de resistencias a la compresión que hay entre los concretos de gránulos individuales, se diseñan mezclas de dos gránulos, con el fin de obtener un concreto de mayor resistencia.

Los datos obtenidos de los ensayos de compresión son los siguientes:

Tabla 3.8. Resistencia a la compresión de concretos con dos granulados

Mezcla de gránulos	Carga máxima (kgf)	Resistencia a la compresión (kg/cm²)
Arena – 6.4 mm	2937.3	71
6.4 mm – 9.5 mm	2122.6	51
9.5 mm – 19.1 mm	1473.3	36

Podemos notar que la mezcla de arena y el granulado de 6.4 mm genera el concreto con la mejor resistencia a la compresión, seguido por el concreto de la mezcla de 6.4 mm-9.5 mm. Al final tenemos nuevamente al concreto con el granulado más grande. De estos datos podemos comentar que un granulado más pequeño elimina la posibilidad de tener huecos en el concreto, por lo que la mezcla queda más compacta y se convierte en un concreto de mayor resistencia a la compresión. Por otro lado, la mezcla de los granulados más grandes genera un concreto débil y más propenso a fallar, gracias a que no hay una unión demasiado fuerte entre los granulados.



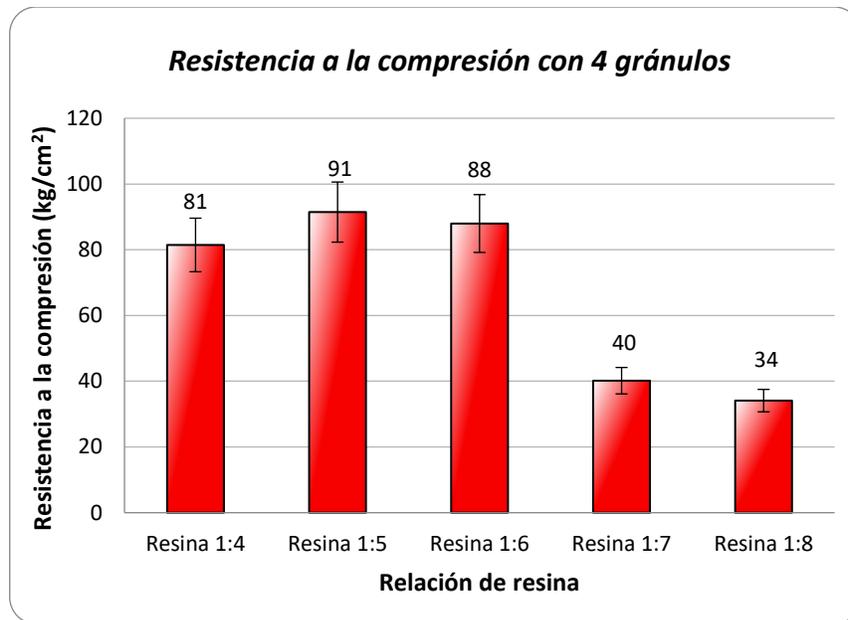
Gráfica 20. Resistencia a la compresión de concretos con dos granulados

3.4.3 Concreto con 4 tipos de gránulos

Siguiendo con la necesidad de generar un concreto altamente resistente, se procede a generar una mezcla con los 4 granulados, evaluando ahora la relación de resina-gránulos que genere el concreto con mayor resistencia, considerando que al referirnos a la resina se trata de la mezcla aglutinante preparada, que incluye a la resina con el acelerante y el propiciador. Los datos obtenidos se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 3.9. Resistencia a la compresión en función de la relación resina-gránulos en concreto de 4 gránulos

Relación resina-gránulos	Carga máxima (kg _f)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)
1:4	3370.9	81
1:5	3785.0	91
1:6	3640.3	88
1:7	1661.9	40
1:8	1411.2	34



Gráfica 21. Resistencia en función de la resina en concreto de 4 gránulos

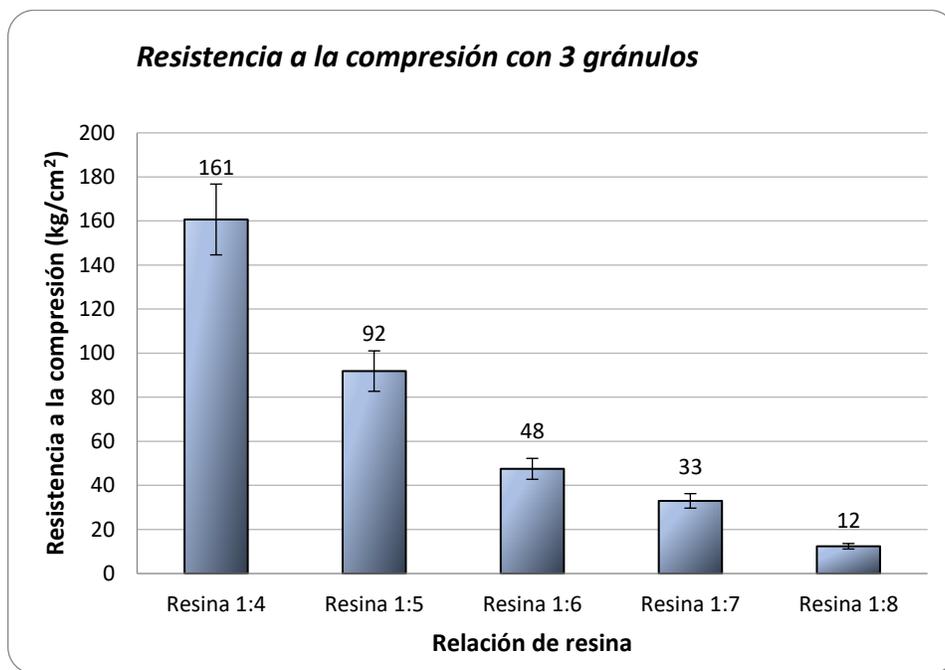
Como podemos observar en la Tabla 3.9 y en la gráfica 21, el concreto con mejores propiedades mecánicas es aquel en el que se utilizó la relación resina-gránulos de 1:5 (es decir, una parte de resina y 5 de granulados). Esto se debe a que esa relación genera una buena adherencia entre los granulados sin que la resina esté en exceso y sea la parte dominante del concreto. En cambio, las relaciones más altas generaron un concreto con una resistencia menor, gracias a que no se homogeniza adecuadamente la resina aglutinante con los granulados.

3.4.4 Concreto con 3 gránulos

Como bien se demostró en el apartado 3.4.1, el concreto con el granulado de 19.1 mm, que es el más grande, genera un concreto con una resistencia a la compresión muy baja, por lo que se decidió dejar de usarlo en este apartado y generar una mezcla con solo 3 granulados. Por otro lado, ahora se busca generar un concreto que sea permeable al agua; para ello, se busca que el concreto tenga la suficiente resistencia a la compresión pero que no esté totalmente compacto, sino que tenga pequeños huecos por los que pueda pasar el agua. También se vuelve a evaluar el efecto de la relación resina (aglutinante)-gránulos. Los datos obtenidos son los siguientes:

Tabla 3.10. Resistencia a la compresión en función de la relación resina-granulado en concretos con 3 granulos

Relación resina-gránulos	Carga máxima (kgf)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)
1:4	6649.4	161
1:5	3802.1	92
1:6	1966.7	48
1:7	1364.2	33
1:8	511.9	12



Gráfica 22. Relación resina-gránulos en concreto con tres granulos

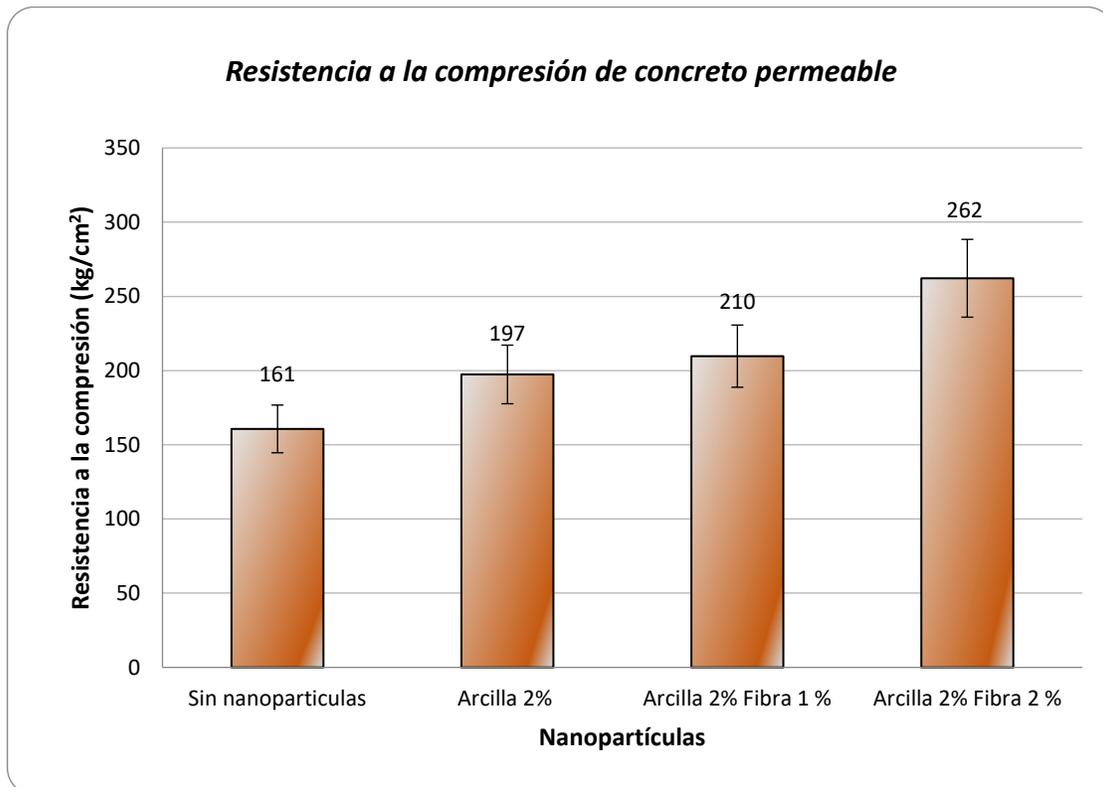
De la Tabla 3.10 obtenemos que la relación resina (aglutinante)-gránulos con mejores propiedades mecánicas es la 1:4, debido a que genera el concreto con la mayor resistencia a la compresión, pero que al mismo tiempo sea permeable gracias a una correcta homogenización y con huecos los suficientemente pequeños para dejar pasar el agua y no afectar la resistencia del concreto.

3.4.5 Concreto permeable

Una vez que se encontró el concreto que otorgue las mejores propiedades mecánicas, pero que además sea permeable al agua, se procede a evaluar el efecto de diversos refuerzos, tanto físicos como químicos. Los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla 3.11. Reforzamiento de concreto permeable con arcilla y fibra de vidrio

Concreto	Carga máxima (kgf)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)
Sin nanopartículas	6649.4	161
Arcilla 2%	8168.0	197
Arcilla 2%, Fibra 1%	8677.8	210
Arcilla 2%, Fibra 2%	10849.8	262



Gráfica 23. Reforzamiento del concreto permeable

De la Tabla 3.11 notamos que, efectivamente, el concreto permeable aumentó la resistencia a la compresión hasta 197 kg/cm² con el uso de arcilla en la resina aglutinante. Al adicionar la fibra de vidrio el valor de la resistencia a la compresión se eleva hasta 210 kg/cm² con 1 % de fibra y 262 kg/cm² con 2 % de fibra. En términos generales, podemos decir que se desarrolló un concreto permeable al agua con una excelente resistencia a la compresión.

3.4.6 Concreto impermeable

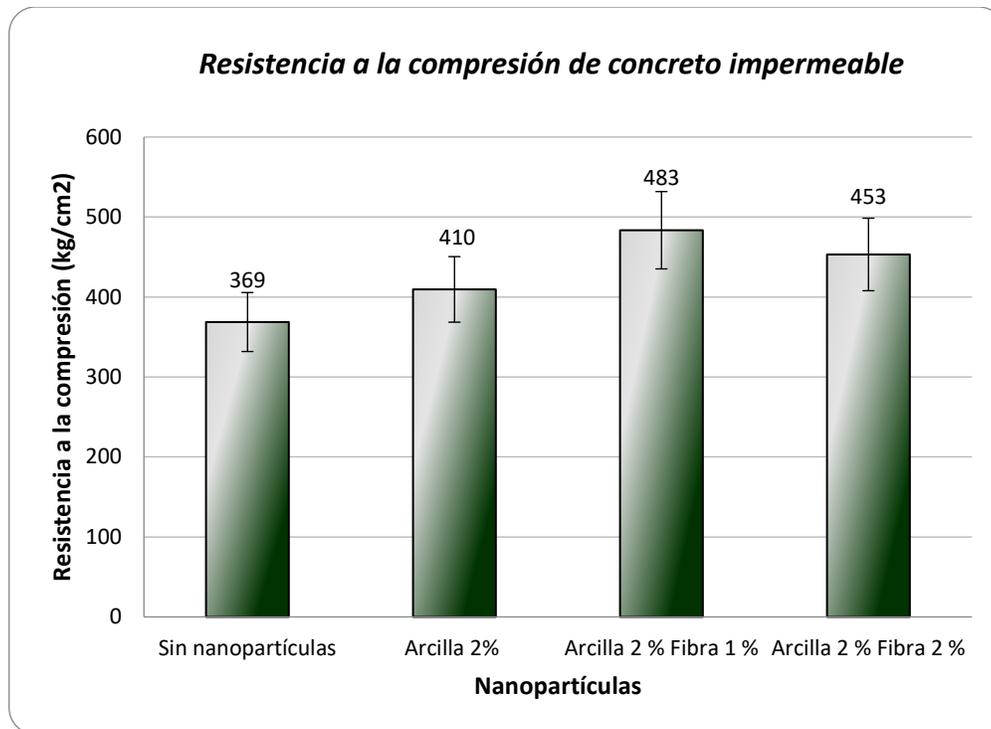
Contrario al concreto permeable, con el concreto impermeable se busca un concreto muy compacto que no deje pasar absolutamente ningún líquido, por lo que se decidió aumentar la cantidad de arena requerida, pues en el apartado 3.4.1 se demostró que la arena tiene una alta resistencia a la compresión por sí sola, por lo que puede aumentar esta característica en nuestro concreto impermeable. Los datos de las pruebas son los siguientes:

Tabla 3.12. Reforzamiento de concreto impermeable con arcilla y fibra de vidrio

Concreto	Carga máxima (kg _f)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)
Sin nanopartículas	15257.8	369
Arcilla 2%	16947.7	410
Arcilla 2%, Fibra 1%	20006.9	483
Arcilla 2%, Fibra 2%	18752.2	453

De acuerdo con la Tabla 3.12 se observa nuevamente que la adición de arcilla aumenta drásticamente la resistencia a la compresión del concreto. De igual manera, la adición de fibra de vidrio eleva aún más la resistencia a la compresión, alcanzando 483 kg/cm² cuando se adiciona 1 % de fibra.

En perspectiva, el concreto polimérico alcanza una excelente resistencia a la compresión, ya que el concreto tradicional tiene una resistencia entre 200 y 300 kg/cm², mientras que nuestro concreto permeable alcanza hasta 262 kg/cm² y el concreto impermeable alcanza hasta 483 kg/cm²



Gráfica 24. Reforzamiento del concreto impermeable

Finalmente podemos decir que los concretos poliméricos producidos tienen una resistencia a la compresión lo suficientemente grande para ser instalados en calles y banquetas, debido a que el concreto permeable con 2% de arcilla y 2% de fibra alcanzó una resistencia a la compresión de 262 kg/cm², mientras que el concreto impermeable con 2% de arcilla y 1% de fibra alcanzó hasta 483 kg/cm²m superando los 200 kg/cm² que indica la normativa vigente.

En comparación a estudios similares, es posible notar que solo el concreto impermeable reforzado con arcilla y fibra de vidrio es superior. El concreto elaborado por (Mahdi, Abbas, & Khan, 2010) a partir de resina proveniente de PET alcanzó una resistencia a la compresión máxima de 430 kg/cm², la cual es un 16.53 % mayor que el concreto sin nanopartículas, pero menor a los 483 kg/cm² alcanzados con el concreto impermeable. Por otro lado, en el estudio de (Kiruthika, Lavanya Prabha, & Neelamegam, 2021) se alcanzó una resistencia a la compresión de 66 kg/m² para el concreto de resina poliéster sin reforzar y 67 kg/cm² con el concreto reforzado con fibra de vidrio. Si bien, se alcanzaron resistencias mayores a las presentadas en este trabajo, se puede adjudicar al hecho de que, tanto la resina como los agregados pétreos no provenían del reciclaje.

3.5 Análisis de espectroscopía infrarroja

El análisis infrarrojo de las probetas de resina curada con y sin arcilla se hizo por FT-IR con un espectrómetro marca Thermo Scientific, modelo Nicolet 6700, con el fin de identificar los principales enlaces. Para ello se utilizaron las probetas usadas en las pruebas de tensión.

En la siguiente figura se muestran los espectros obtenidos de cada muestra. Dichos espectros se desplazaron sobre el eje de transmitancia con el fin de poder hacer una comparativa entre ellos.

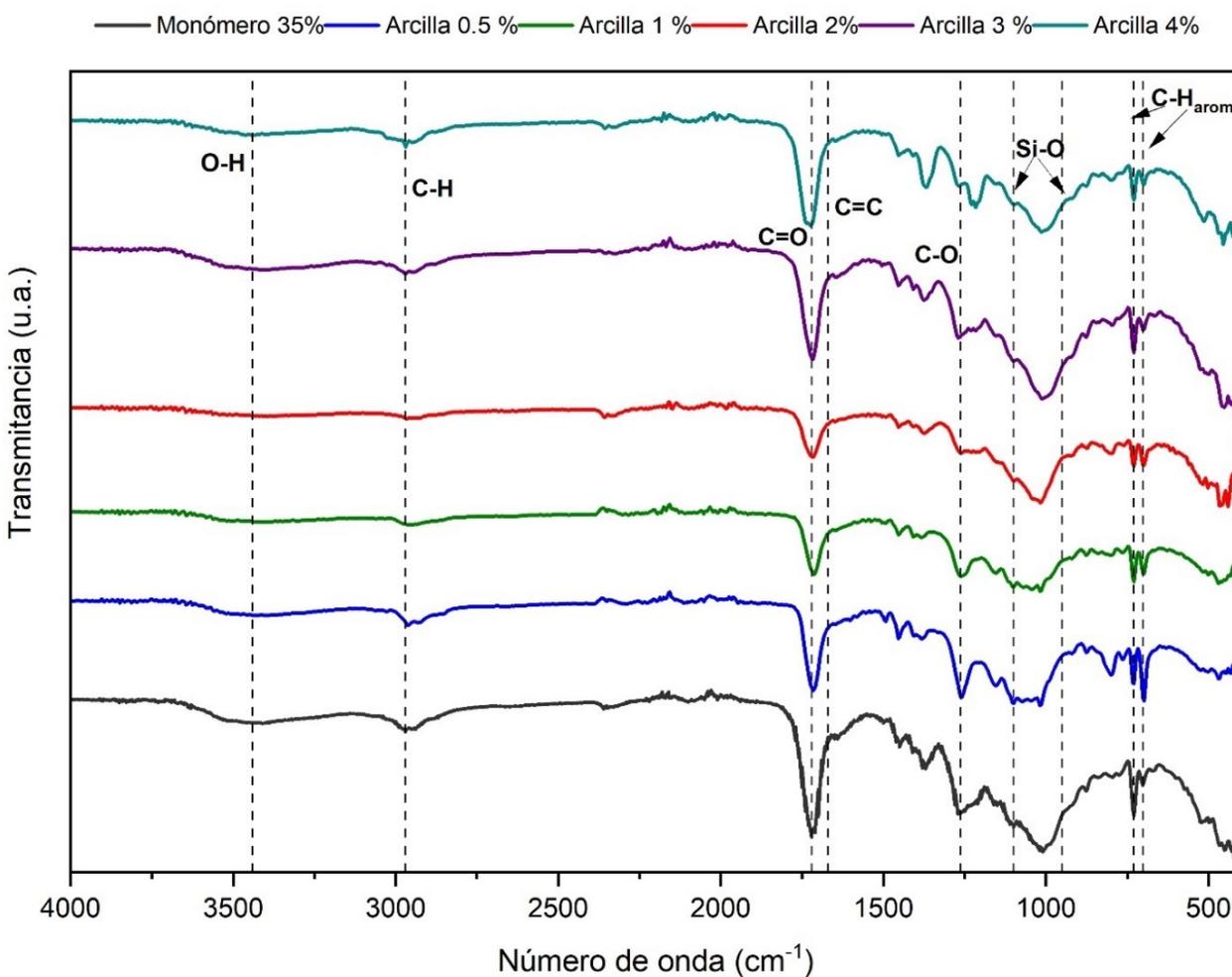


Figura 3.2. Espectros FT-IR de la resina curada sin y con arcilla a diferentes concentraciones

De acuerdo con (Bórquez-Mendivil, y otros, 2022) la banda ancha de 3440 cm⁻¹ se atribuye al grupo hidroxilo que, además, se encuentra formando puentes de hidrógeno.

Dichos hidroxilos pueden pertenecer a la resina o al aminoácido lisina que se encuentra en interacción electrostática con la parte negativa de la arcilla. La pequeña banda en 2970 cm^{-1} corresponde al estiramiento C-H de grupos CH_3 , CH_2 y CH. Por otro lado, la banda intensa en 1720 se debe al estiramiento del enlace C=O del carbonilo de éster que se forma durante la polimerización. En contraparte, la ausencia de señales entre 1680 y 1600 cm^{-1} nos indica que no hay enlaces C=C provenientes del estireno o del anhídrido maléico (usado en la elaboración de la resina), dándonos a entender que la reacción de reticulación de la resina con el estireno sí se llevó a cabo, lo que agotó la disponibilidad de dichos enlaces. La banda que aparece de 1325 a 1300 cm^{-1} corresponde a la torsión en el plano de los hidrógenos del grupo aromático. En lo que respecta a la banda de 1263 cm^{-1} se debe al estiramiento del enlace C-O propio del éster.

La banda ancha que se encuentra entre 1100 y 950 cm^{-1} se asocia a los grupos silicato de la bentonita, que además se solapa con otras bandas (como la de 990 cm^{-1} perteneciente a la flexión C-H de grupos aromáticos). De esta banda podemos notar que, a una mayor concentración de arcilla, también será mayor la intensidad de la banda. Finalmente, las bandas de 730 y 700 cm^{-1} corresponden a la flexión fuera del plano de C-H en grupos aromáticos.

Con este análisis podemos saber que la resina proveniente del PET reacciona con monómero de estireno y se genera el aglutinante para los gránulos de concreto, debido al entrecruzamiento que se da entre los sitios de insaturación de la resina y el estireno.

Respecto a la arcilla con lisina y su interacción con la resina curada, no es posible observar alguna banda que muestre si hay reacción, por lo que solo podemos pensar que la interacción es por medio de puentes de hidrógeno de acuerdo con (Bonilla-Blancas, y otros, 2019).

Capítulo 4. Conclusiones

- Se cumplió el objetivo principal el cual era producir un concreto polimérico con una resistencia a la compresión mayor a 200 kg/cm^2 para ser utilizado en la construcción de calles banquetas, gracias a que superan las resistencias típicas necesarias para banquetas y calles.
- Se determinó que las mejores propiedades mecánicas de la resina curada se dan cuando se agrega una concentración de 35 % de monómero de estireno.
- Se determinó que las impurezas afectan en gran medida al curado de la resina, por lo que se recomienda que la tinta proveniente de las botellas de reuso sea retirada antes de que pase a la parte de reciclado.
- Se observó que el granulado más grande (19.1 mm) genera una pobre resistencia a la compresión, mientras que el más pequeño (arena) genera la resistencia más alta, de tal manera que solo se consideran los granulados de 6.4 mm, 9.5 mm y arena para elaborar el concreto permeable e impermeable.
- Con esta propuesta de concreto polimérico se motiva a darle un nuevo uso a las botellas de PET (en forma de resina) y al concreto reciclado triturado (gránulos) con el fin de impulsar la economía circular, además de cumplir con la normativa vigente de la ciudad.

Trabajo a futuro

El presente trabajo aún tiene muchas áreas de oportunidad, por lo que a continuación se presentan algunas recomendaciones:

- La normativa de uso de materiales reciclados se podría extender a nivel nacional en lugar de que solo sea obligatoria en la Ciudad.
- Se deben realizar más pruebas mecánicas similares a las que se le realizan al concreto tradicional, así como el desarrollo de nuevas metodologías de análisis para estos materiales, ya que hoy en día no existen normas o protocolos para evaluar otras propiedades del concreto polimérico.
- Se debe hacer más investigación y desarrollo para obtener una ruta de obtención de resina poliéster insaturada de menor costo.

Anexos

Anexo A

Especificaciones para las pruebas mecánicas de tensión según la norma ASTM D638: Método de prueba para propiedades de tracción de los plásticos (American Society of Testing Materials, 2014).

Especímenes (probetas): Los especímenes deben cumplir las especificaciones para probetas tipo 1:

W (ancho de la sección estrecha): 13 mm

L (longitud de la sección estrecha): 57 mm

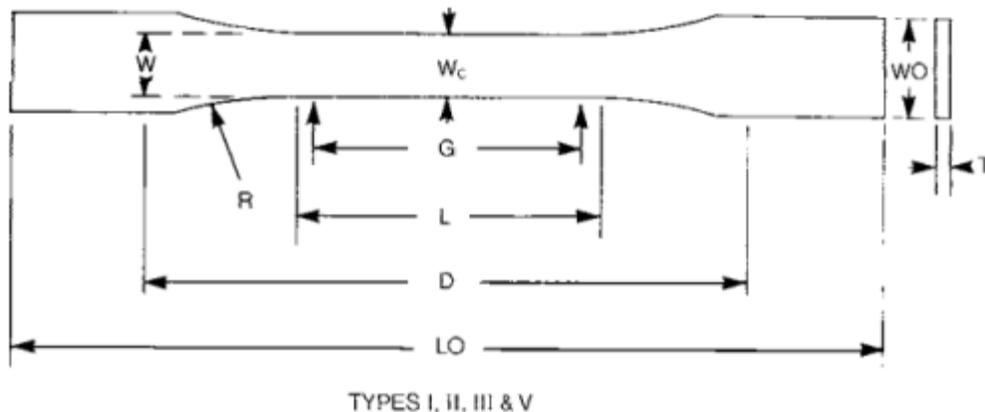
WO (Ancho total): 19 mm

LO (longitud total): 165 mm

D (distancia entre empuñaduras): 115 mm

R (Radio del filete): 76 mm

L (Longitud del calibre): 50 mm



Se deben ensayar al menos cinco probetas por cada muestra de material a una velocidad de 5 mm/min y se deben descartar las probetas que se rompan por algún defecto,

Anexo B

Especificaciones para las pruebas mecánicas de flexión según la norma ASTM D790: Método de prueba estándar para propiedades de flexión de plásticos reforzados y no reforzados y materiales de aislamiento eléctrico (American Society of Testing Materials, 2017).

Especímenes (probetas): Son aceptables las probetas de ensayo cortadas a partir de chapas, placas o formas extruidas o moldeadas a las dimensiones acabadas deseadas.

La profundidad/espesor de la probeta no superará el ancho. La sección transversal de las probetas será rectangular con caras opuestas planas y paralelas.

Para materiales de 1.6 mm o de mayor espesor la profundidad de la muestra debe ser del espesor del material

Para todos los ensayos el tramo de apoyo debe ser de 16 veces la profundidad del ancho de la viga. El ancho de la probeta no debe exceder un cuarto de la longitud del soporte para las probetas superiores a 3.2 mm.

El espécimen debe ser lo suficientemente largo para permitir un espacio libre en los extremos de al menos el 10 % de la longitud del soporte.

Para cada muestra se deben ensayar 5 especímenes a una velocidad de 3 mm/min.

Anexo C

Procedimiento para acondicionar el tubo para probeta de concreto

1. Un tubo comercial de PVC de 70 mm de diámetro se corta en segmentos con una longitud de 90 mm
2. Para evitar lastimarse con los restos del cortado, se lijan los extremos del tubo hasta que no esté afilado.
3. Se recortan cuadrados de plástico con el tamaño suficiente para tapar un extremo del tubo.
4. Se sella un lado del tubo con ayuda del trozo de plástico y se fija a las paredes exteriores del tubo con cinta adhesiva, cuidando que quede firme y totalmente sellado.
5. Se unta vaselina en el interior para que actúe como lubricante. Este será nuestro tubo para probeta de concreto



Anexo D

Especificaciones para las pruebas mecánicas de compresión según la norma ASTM C39: Método de prueba estándar para resistencia a la compresión de probetas cilíndricas de concreto. (American Society of Testing Materials, 2021)

Especímenes: Los especímenes no se deben ensayar si cualquier diámetro individual de un cilindro difiere de cualquier otro diámetro del mismo cilindro en un 2 %. Ninguno de los extremos de las probetas debe apartarse de la perpendicularidad al eje en más de $0,5^\circ$ (aproximadamente 1 mm en 100 mm). Los extremos de los especímenes de prueba de compresión que no sean planos dentro de 0.002 pulgadas [0.050 mm] deben ser aserrados o esmerilados para cumplir con esa tolerancia, o tapados de acuerdo con la Práctica C 617 o, cuando esté permitido, la Práctica C 1231/C 1231M.

El diámetro utilizado para calcular el área de la sección transversal del espécimen de ensayo debe determinarse con una precisión de 0,01 pulg. [0,25 mm] promediando dos diámetros medidos en ángulo recto entre sí aproximadamente a la mitad de la altura del espécimen.

La longitud debe medirse con una precisión de 0,05 D cuando la relación entre la longitud y el diámetro sea inferior a 1,8 o superior a 2,2, o cuando el volumen del cilindro se determine a partir de las dimensiones medidas.

Se deben ensayar 3 especímenes a una velocidad de 1.3 mm/min

Calcule la resistencia a la compresión del espécimen dividiendo la carga máxima soportada por el espécimen durante el ensayo por el área transversal promedio determinada

Si la relación entre la longitud y el diámetro del espécimen es de 1,75 o menos, corrija el resultado obtenido en 8.1 multiplicando por el factor de corrección apropiado que se muestra en la siguiente tabla:

L/D	1.75	1.50	1.25	1.00
Factor	0.98	0.96	0.93	0.87

Bibliografía

- Ambiente Plástico. (23 de Enero de 2023). *Reciclaje de plásticos: México recolectará el 80% de PET en 2030*. Recuperado el 18 de Febrero de 2023, de Ambiente Plástico: <https://www.ambienteplastico.com/reciclaje-de-plasticos-mexico-recolectara-el-80-de-pet-en-2030/>
- American Society of Testing Materials. (2014). *ASTM D638-14: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*. doi:10.1520/D0638-14
- American Society of Testing Materials. (2017). *ASTM D790-17: Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*. doi:10.1520/D0790-17
- American Society of Testing Materials. (2021). *ASTM C39/C39M-21: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. doi:10.1520/C0039_C0039M-21
- Askeland, D., & Wright, W. (2016). Propiedades mecánicas: primera parte. En D. Askeland, & W. Wright, *Ciencia e Ingeniería de Materiales* (Séptima ed., págs. 181-191). Cengage Learning Editores S.A. de C.V.
- Barboza, E., & et.al. (2009). Determination of a recyclability index for the PET glycolysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 122-128. doi:10.1016/j.resconrec.2008.10.002
- Besoain, E. (1985). Introducción. En *Mineralogía de arcilla de suelos* (págs. 8-13). San José, Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
- Billmeyer, F. W. (2004). La ciencia de las macromoléculas; Resinas termoestables. En *Ciencia de los polímeros* (págs. 3-10;478-481). Barcelona, España: Editorial Reverté.
- Bonilla-Blancas, A., Romero-Ibarra, I., Vazquez-Arenas, J., Sanchez-Solis, A., Manero, O., & Alvarez-Ramirez, J. (2019). Molecular interactions arising in polyethylene-bentonite nanocomposites. *Journal of Applied Polymer Science*, 46920. doi:10.1002/app.46920

-
- Bórquez-Mendivil, A., Hurtado-Macías, A., Leal-Pérez, J. E., Flores-Valenzuela, J., Vargas-Ortíz, R. A., Cabrera-Covarrubias, F. G., & Almaral-Sánchez, J. L. (2022). Hybrid Coatings of SiO₂-Recycled PET Unsaturated Polyester Resin by Sol-Gel Process. *Polymers*, 3280. doi:10.3390/polym14163280
- Buntech del Lago S.A. (2011). *Producto*. Recuperado el 20 de Febrero de 2023, de Bentonita del Lago: <http://www.bentonita-dellago.com.ar/producto.html>
- Byron, D., Pacheli, A., Neves, J., Patricio de Souza, P., & Santiago de Oliveira, S. (2021). Evaluation of properties of polymer concrete based on epoxy resin and functionalized carbon nanotubes. *Construction and Building Materials*, 309. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.125155
- CEMEX. (19 de Junio de 2019). *Hablando de Cementos Portland*. Recuperado el 18 de Febrero de 2023, de Cemex. Artículos de Construcción: <https://www.cemex.com.pe/-/hablando-de-cementos-portland>
- CEMEX. (2021). *Resistencia*. Recuperado el 07 de Marzo de 2023, de CEMEX México: https://www.cemexmexico.com/quizzes-full-view/-/asset_publisher/uG2W76KBBu5B/content/resistencia-pruebas-y-resultados
- Chandra, S., & Bernstsson, L. (Mayo de 1983). Technical notes: Influence of polymer microparticles on acid resistance of structural lightweight aggregate concrete. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 5, 127-131.
- Chemische Fabrik Budenheim KG. (2021). *Concreto*. Recuperado el 18 de Febrero de 2023, de Budenheim: <https://www.budenheim.com/es/soluciones/construccion/concreto#:~:text=El%20concreto%20es%20una%20mezcla,ser%20utilizado%20bajo%20el%20agua>.
- Crespo, K., Figueroa-Hernández, C., Carvajal de la Osa, J., Gómez-González, R., & Fumero-Pérez, A. (2020). Máquina para ensayo de compresión en materiales utilizados en ingeniería de tejidos. *Revista Cubana de Ingeniería*, 11-21.

-
- Cuadros, J., Aldega, L., Vetterlein, J., Drickamer, K., & Dubbin, W. (2009). Reactions of Lysine with Montmorillonite at 80 °C: Implications of Optical Activity, H⁺ transfer and Lysine-Monmorillonite binding. *Journal of Colloid and Interface Science*, 333(1), 78-84.
- Ellen Macarthur Foundation. (2017). *Economía Circular*. Recuperado el 20 de Febrero de 2023, de Ellen Macarthur Foundation: <https://archive.ellenmacarthurfoundation.org/es/economia-circular/concepto#:~:text=La%20econom%C3%ADa%20circular%20es%20una,de%20sistema%20desde%20el%20dise%C3%B1o>.
- Esmaeili, J., Andalibi, K., & Gencel, O. (2021). Mechanical characteristics of experimental multi-scale steel fiber reinforced. *Construction and Building Materials*, 313. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.125500
- FEMISA. (24 de Noviembre de 2011). *Bentonita de Perforación, cálcica y sódica*. Recuperado el 6 de Marzo de 2023, de Fertilizantes y Minerales (FEMISA) S.A. de C.V.: <https://3215.mx.all.biz/bentonita-de-perforacin-calcica-y-sdica-g16368>
- Fowler, D. W. (1999). Polymers in concrete: a vision for the 21st century. *Cement & Concrete Composites*, 21, 449-452.
- Garcia, E., & Suárez, M. (2016). *Las Arcillas: propiedades y usos*. Recuperado el 25 de Enero de 2023, de <http://www.ingenieroambiental.com/nov/ga.pdf>
- Gobierno del Distrito Federal. (22 de Abril de 2022). *Reglamento de construcciones para el Distrito Federal. Última reforma 2022*.
- Gorninski, J., Dal Molin, D., & Kazmierczak, C. (2004). Study of the modulus of elasticity of polymer concrete compounds and portland cement concrete. *Cement and Concrete Research*, 34, 2091-2095. doi:10.1016/j.cemconres.2004.03.012
- Gündüz, G., & Yalçın, N. (1987). Strength of steel-fibre-reinforced polymer concrete: Effect of impregnation technique. *Composites Science and Tchenology*, 30, 127-135.

-
- Halil Akin, M., & Polat, R. (2022). The effect of vehicle waste tires on the mechanical, hardness and stress-strain properties of polyester-based polymer concretes. *Construction and Building Materials*. doi:doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126741
- Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C. (Febrero de 2009). Determinación del Módulo de elasticidad y relación de Poisson NMX-C-128-1997-ONNCCE. Segunda Parte. *El concreto en la obra. Problemas, causas y soluciones(18)*, 68-71.
- Kandelbauer, A., Tondi, G., Zaske, O., & Goodman, S. (2014). Unsaturated Polyesters and Vinyl Esters. En A. Kandelbauer, G. Tondi, O. Zaske, & S. Goodman, *Handbook of Thermoset Plastics* (págs. 111-172). California: Elsevier Inc.
- Mahdi, F., Abbas, H., & Khan, A. (2010). Strength characteristics of polymer mortar and concrete using different compositions of resins derived from post-consumer PET bottles. *Construction and Building Materials*, 25-36.
- Martínez-Barrera, G., Martínez-López, M., & Martínez-Cruz, E. (2013). Concreto polimérico reforzado con fibras de Luffa. *Información Tecnológica*, 24, 67-74. doi:10.4067/S0718-07642013000400008
- Muthunkumar, D., & Mohan, D. (Septiembre de 2004). Studies on polymer concretes based on optimized aggregate mix proportion. *European Polymer Journal*, 40, 2167-2177. doi:10.1016/j.eurpolymj.2004.05.004
- National Center for Biotechnology Information. (2023). *Lysine*. Recuperado el 25 de Enero de 2023, de PubChem Compound Summary for CID 5962, Lysine: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Lysine>
- Newell, J. (2011). Medición de las propiedades mecánicas. En *Ciencia de Materiales. Aplicaciones en Ingeniería* (págs. 68-81). D.F., México: Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación S.C. (2014). *Norma NMX-C-083-ONNCCE-2014*. Recuperado el 07 de Marzo de

-
- 2023, de <https://www.onncce.org.mx/index.php/es/venta-normas/fichas-tecnicas?view=item&id=1674>
- Osorio, J. D. (2022). *¿Qué es el módulo de elasticidad en el concreto?* Recuperado el 7 de Marzo de 2023, de Argos 360: <https://360enconcreto.com/blog/detalle/elasticidad-del-concreto/>
- Osorio, J. D. (2022). *Resistencia mecánica del concreto y resistencia a la compresión*. Recuperado el 7 de Marzo de 2023, de 360 en Concreto: <https://360enconcreto.com/blog/detalle/resistencia-mecanica-del-concreto-y-compresion/>
- Parbhakar, A., Cuadros, J., Sephton, M., Dubbin, W., Coles, B., & Weiss, D. (2007). Adsorption of L-lysine on Montmorillonite, *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 133(2), 142-149.
- Parlamento Europeo. (Febrero de 2023). *Economía circular: definición, importancia y beneficios*. Recuperado el 6 de Marzo de 2023, de Noticias. Parlamento Europeo: <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/economy/20151201STO05603/economia-circular-definicion-importancia-y-beneficios>
- Ramírez-Palma, G., Alcocer-Márquez, L., Alcántar-González, F., Turati-Ramírez de Arellano, P., & Cruz-Gómez, M. (2017). Resinas poliéster insaturadas a partir de PET de desecho glicolizado: síntesis y caracterización. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 1003-1010.
- Rebeiz, K. (1996). Precast use of polymer concrete using unsaturated polyester resin based on recycled PET waste. *Construction and Building Materials*, 215-220.
- Rodgers, L. (17 de Diciembre de 2018). *La enorme fuente de emisiones de CO2 que está por todas partes y que quizá no conocías*. Recuperado el 21 de Febrero de 2023, de BBC News Mundo: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-46594783#:~:text=La%20producci%C3%B3n%20de%20cemento%20Portland,consumen%20grandes%20cantidades%20de%20energ%C3%ADa.>

-
- Rodriguez, F. (1984). Introducción. En *Principios de Sistemas de Polímeros* (págs. 1-8). México, D.F.: McGraw-Hill Book Company.
- Sánchez-Solís, A., Pérez-Chávez, R., Sánchez-Vázquez, B., & Manero-Brito, O. (2020). *Instituto Mexicano de la Propiedad Intelectual (IMPI) Patente n° 376074. Exp. MX/a/2013/010642.*
- Schubel, P. J., Johnson, M. S., Warrior, N. A., & Rudd, C. D. (2006). Characterisation of thermoset laminates for cosmetic automotive applications: Part III – Shrinkage control via nanoscale reinforcement. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37, 1757-1772. doi:10.1016/j.compositesa.2005.09.014
- Secretaría de Obras y Servicios. (2021). *Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto con comentarios.*
- Secretaría del Medio Ambiente. (2016). Programa de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) 2016-2020. Ciudad de México. Recuperado el 27 de Febrero de 2023
- Secretaría del Medio Ambiente. (2019). *Norma NACDMX-007-RNAT-2019.* Recuperado el 27 de Febrero de 2023, de http://data.sedema.cdmx.gob.mx/sitios/conadf/documentos/proyectos-normas/NACDMX_007_RNAT_2019.pdf
- Shaker, F., El-Dieb, A., & Reda, M. (Mayo de 1997). Durability of Styrene-Butadiene latex modified concrete. *Cement and Concrete Research*, 27, 711-720.
- Skoog, D. A., Holler, F., & Nieman, T. (2001). Espectrometría de absorción en el infrarrojo. En *Principios de análisis instrumental* (págs. 409-431). Madrid: McGraw-Hill/Interamericana de España S.A.U.
- Suh, D., Lim, Y., & Park, O. (2000). The property and formation mechanism of unsaturated polyester-layered silicate nanocomposite depending on the fabrication methods. *Polymer*, 8557-8563. doi:10.1016/S0032-3861(00)00216-0
- Turi, E. A. (1981). Thermosets. En *Thermal Characterization of polymeric materials* (págs. 435-450). New York: Academic Press.

-
- Universidad de Alicante. (20 de Junio de 2022). *Espectroscopía Infrarroja*. Recuperado el 20 de Febrero de 2023, de Servicios Técnicos de Investigación. Universidad de Alicante: <https://sstti.ua.es/es/instrumentacion-cientifica/unidad-de-rayos-x-de-monocristal-y-espectroscopias-vibracional-y-optica/espectroscopia-infrarroja.html>
- Vaidya, U., & Nadkarni, V. (1987). Unsaturated polyester resins from poly(ethylene terephthalate) waste. 1. Synthesis and characterization. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 194-198.
- Valdéz-Rodríguez, O. A., & et.al. (2014). Determinación de las curvas esfuerzo-determinación sobre cargas axiales de una raíz tropical. *Congreso Internacional en Ingeniería Electrónica*, 36, págs. 82-85. Chihuahua, Chih. Obtenido de http://depi.itchihuahua.edu.mx/display/memorias_electro/MemoriaElectro2014
- Valencia, M., Collazos, P., Mina, J., & Toro, E. (2010). Caracterización fisiomecánica de concreto polimérico basado en resina poliéster. *Revista científica Guillermo de Ockham*, 8(1), 83-93.
- Wade, L. (2012). Espectroscopía infrarroja y espectrometría de masas. En *Química Orgánica* (Séptima Edición ed., Vol. 1, págs. 510-519). México: Pearson Educación de México S.A. de C.V.
- Yalçin, N., & Gündüz, G. (Noviembre de 1986). Tensile and impact strengths of steel fiber reinforced polymer impregnated concrete. *Cement and Concrete Research*, 16, 793-797.
- Zwick Roell. (2019). *Ensayo de Compresión*. Recuperado el 7 de Marzo de 2023, de Zwick Roell: <https://www.zwickroell.com/es/sectores/ensayo-de-materiales/ensayo-de-compresion/>