



Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
Facultad de Ingeniería  
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

## ESTUDIO DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LAS PROPIEDADES DE MORTEROS POLIMÉRICOS

### T E S I S

Que para obtener el grado de:

Maestra en Metalurgia e Ingeniería de Materiales

Presenta:

I.Q. Lorena Hernández Hernández

Asesor:

Dra. Juana María Miranda Vidales

Coasesor:

Dra. Lilia Narváez Hernández

San Luis Potosí, S. L. P.

Enero 2018





Universidad Autónoma  
de San Luis Potosí

26 de octubre de 2017

**I.Q. LORENA HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ  
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por las **Dras. Juana María Miranda Vidales y Lilia Narváez Hernández**, Asesora y Co-asesora de la Tesis que desarrollará Usted con el objeto de obtener el Grado de **Maestra en Metalurgia e Ingeniería de Materiales**, me es grato comunicarle que en la Sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 26 de octubre del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

**TEMARIO:**

**"ESTUDIO DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LAS PROPIEDADES DE MORTEROS POLIMÉRICOS"**

Introducción.

1. Uso de polímeros en la industria de la construcción.
2. Metodología y composiciones de los materiales.
3. Comportamiento de los morteros poliméricos frente a la temperatura.

Conclusiones.

Referencias.

**"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"**

**A T E N T A M E N T E**

**M. I. JORGE ALBERTO PÉREZ GONZÁLEZ  
DIRECTOR**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DE SAN LUIS POTOSÍ  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIRECCION



**FACULTAD DE  
INGENIERÍA**

Copia. Archivo.  
\*etn.

Av. Manuel Nava 8  
Zona Universitaria • CP 78290  
San Luis Potosí, S.L.P.  
tel. (444) 826 2330 al39  
fax (444) 826 2336  
www.uaslp.mx

## Contenido

---

RESUMEN.....	III
ABSTRACT .....	V
INTRODUCCIÓN .....	VII
OBJETIVOS.....	IX
<b>CAPÍTULO I. USO DE POLÍMEROS EN LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN.</b> .....	<b>1</b>
1.1. Polímeros. Definición y clasificación.....	<b>2</b>
1.1.1. Clasificación de los polímeros.....	4
1.2. Fundamentos de morteros modificados con polímeros.....	<b>6</b>
1.2.1. Mortero o concreto de cemento Portland.....	7
1.2.2. Concreto impregnado de polímero.....	8
1.2.3. Concreto modificado con polímeros.....	10
1.2.4. Concreto polimérico.....	12
1.3. Aplicación de residuos plásticos en concretos y morteros.....	<b>15</b>
1.4. Degradación en polímeros.....	<b>18</b>
<b>CAPÍTULO II. METODOLOGÍA Y COMPOSICIONES DE LOS MATERIALES.....</b>	<b>23</b>
2.1. Materiales para la elaboración de morteros.....	<b>24</b>
2.1.1. Resina de poliéster insaturada.....	24
2.1.2. Cemento: Tipo Portland CPC-30R.....	24
2.1.3. Agregado fino: Arena sílica estandarizada.....	24
2.1.4. Sustituto de agregado fino : partículas de desecho de PET.....	25
2.1.5. Agua: agua potable proveniente de la red municipal.....	26
2.2. Preparación de los morteros.....	<b>26</b>
2.2.1. Morteros poliméricos sin y con partículas de PET.....	26
2.2.2. Morteros de cemento Portland (MCP).....	28
2.3. Caracterización de la resina de poliéster insaturada y partículas de PET.....	<b>29</b>
2.4. Tratamiento térmico a los morteros poliméricos.....	<b>29</b>
2.5. Técnicas para la evaluación del efecto de la temperatura sobre morteros poliméricos sin y con partículas de desecho de PET.....	<b>30</b>

2.5.1.	Determinación de la porosidad y densidad en los morteros poliméricos tratados térmicamente.....	30
2.5.2.	Ensayo de resistencia a la compresión.....	32
2.5.3.	Ensayo de resistencia a la flexión.....	33
2.6.	Análisis de la morfología de los morteros poliméricos sin y con partículas de PET mediante microscopía.....	33
2.6.1.	Microscopía estereoscópica.....	34
2.6.2.	Microscopía electrónica de barrido (MEB).....	34
2.7.	Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR).....	35
<b>CAPÍTULO III. COMPORTAMIENTO DE LOS MORTEROS POLIMÉRICOS FRENTE A LA TEMPERATURA.....</b>		<b>36</b>
3.1.	Caracterización de la resina y de las partículas de PET por difracción de rayos X.....	37
3.2.	Determinación del porcentaje óptimo de partículas de desecho de PET a sustituir en los morteros poliméricos.....	38
3.2.1.	Determinación de la resistencia a la compresión de los morteros poliméricos con partículas de desecho de PET.....	39
3.2.2.	Determinación de porosidad y densidad de los morteros poliméricos con partículas de desecho de PET.....	40
3.3.	Comportamiento mecánico de los morteros poliméricos a altas temperaturas.....	44
3.3.1.	Resistencia a la compresión de los morteros poliméricos tratados térmicamente.....	44
3.3.2.	Resistencia a la flexión de los morteros poliméricos tratados térmicamente.....	47
3.4.	Degradación térmica de los morteros poliméricos.....	52
3.4.1.	Degradación térmica de un poliéster.....	52
3.5.	Análisis de la estructura de la resina de poliéster insaturada mediante FTIR.....	58
3.6.	Análisis de la microestructura de los morteros poliméricos tratados térmicamente.....	62
3.6.1.	Desarrollo de la matriz polimérica y las partículas de PET.....	62
3.6.2.	Evolución de la porosidad y densidad en los morteros poliméricos tratados térmicamente.....	73
3.7.	Comparación de un MP frente a un MCP.....	76
<b>CONCLUSIONES.....</b>		<b>79</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>		<b>81</b>

## Resumen

---

Los morteros poliméricos están formados por una mezcla principalmente de resina/arena, en los últimos años su uso en la industria de la construcción se ha incrementado considerablemente debido a sus diversas propiedades. Sin embargo, una de las limitantes que presentan estos materiales poliméricos, es su inestabilidad en diferentes medios.

En el siguiente trabajo se estudió el efecto de la temperatura en las propiedades mecánicas y físicas de morteros poliméricos elaborados a base de una resina de poliéster insaturada, en los cuales se sustituyó agregado mineral por partículas de desecho de PET.

Primero se determinó el porcentaje óptimo de partículas de desecho de PET a sustituir por agregado mineral. Se elaboraron morteros poliméricos con una relación en peso de resina termoestable/arena de 20/80, respectivamente; se sustituyeron porcentajes de partículas de desecho de PET en 1%, 2% y 3% por agregado fino. Se evaluó el efecto de la sustitución de la arena en estos morteros mediante ensayos de resistencia a la compresión y determinación de % en volumen de poros permeables y densidad. Los resultados arrojan que la incorporación de partículas de desecho de PET mejora la resistencia a la compresión en los morteros poliméricos, con 1% y 2% de partículas de PET, después de esa cantidad aumenta la cantidad de defectos generados por los desechos plásticos en el mortero, afectando el desempeño mecánico. Se optó por elegir el mortero polimérico con 1% de PET (MP1), al ofrecer la mayor resistencia a la compresión y presentar la menor cantidad de defectos (poros permeables).

Posteriormente, los morteros poliméricos sin y con 1% de partículas de desecho de PET se sometieron a tratamientos térmicos a 40 °C, 100 °C, 200 °C y 300 °C, por un tiempo de exposición de 3h. Después se determinó la resistencia a la compresión y flexión, con el objetivo de observar el efecto de la temperatura en el desempeño mecánico de estos morteros. De igual manera se determinó el % en volumen de poros permeables, con el fin de evaluar la evolución de los poros de los morteros después del tratamiento térmico.

Al analizar estos resultados, dependiendo de la temperatura de tratamiento, se presentaron cambios significativos en las propiedades antes mencionadas. Primero se presenta un post-curado térmico en la resina por debajo de 200 °C, el cual mejora las propiedades mecánicas

de los morteros poliméricos; y después de esta temperatura se presenta la degradación térmica de la resina de poliéster y cambios físicos en las partículas de desecho de PET, lo que genera esfuerzos térmicos, causantes de la formación de grietas en el material. Estas grietas son las responsables de la disminución de las propiedades mecánicas y el aumento de la cantidad de poros en el material.

Por último, se compararon los resultados de los morteros poliméricos sin tratamiento térmico con un mortero base cemento Portland. Los resultados muestran que el mortero polimérico, incluso sin partículas de PET, presenta mejor resistencia mecánica y una menor cantidad de poros, inclusive aquellos que tienen hasta un 3% de partículas de desecho de PET.

## Abstract

---

The polymer mortars are formed by a mixture resin/sand, in recent years its use in the construction industry has increased considerably due to its various properties. However, one of the limitations of these polymeric materials is their instability in different media.

In this work, the effect of temperature on the mechanical and physical properties of polymer mortars made from an unsaturated polyester resin, in which mineral aggregate was replaced by PET waste particles, was studied.

First, the optimum percentage of PET waste particles to be replaced by mineral aggregate was determined. Polymer mortars were made with a thermoset resin/sand weight ratio of 20/80, respectively; percentages of PET waste particles were replaced by 1%, 2% and 3% by fine aggregate (sand). The effect of sand substitution on these mortars was evaluated through compression tests and determination of % in volume of permeable pores and density. The results show that the incorporation of PET waste particles improves the compression strength in polymer mortars, with 1% and 2% of PET particles, after that amount increases the quantity of defects generated by plastic waste in the mortar affect mechanical performance. With the aforementioned it is concluded that the polymer mortar with 1% PET, offers the highest compression strength and the lowest number of defects (permeable pores).

Subsequently, polymer mortars without and with PET waste particles (MP0 and MP1) were subjected to a thermal treatment at 40 °C, 100 °C, 200 °C and 300 °C, for an exposure time of 3 hours. Then the compression and bending strength were determined, with the objective of observing the effect of temperature on the mechanical performance of these mortars. In the same way tests of determination of % in volume of permeable pores were carried out, in order to evaluate the pores evolution of the mortars after the thermal treatment.

Depending on the treatment temperature, changes were made in the polymer mortars. First there is a thermal post-curing in the resin below 200 °C, which improves the mechanical properties of polymer mortars; and after this temperature the thermal degradation of the polyester resin and physical changes in the PET waste particles take place, which generates the presence of thermal stresses, which are the cause of the formation of cracks in the material. These defects (cracks) are responsible for the decrease in mechanical properties and the increase in the number of pores in the material.

At last, the results of polymer mortars without heat treatment were compared with a Portland cement mortar. The results show that the polymer mortar, even without PET particles, presents better mechanical resistance and fewer pores than the cement mortar, even those that contain up to 3% PET waste particles.



## Introducción

---

El mortero polimérico (MP) es un material compuesto que consiste en una mezcla de agregados finos y una resina polimérica termoestable como aglutinante. Estos morteros no contienen una fase de cemento hidratado, aunque el cemento Portland se puede usar como agregado o relleno [1, 2]. Este material compuesto se caracteriza por una gran resistencia química, por un rápido endurecimiento, una buena adherencia con los agregados y resistencias mecánicas hasta en un 50% superiores a los materiales a base de cemento [2, 3]. Debido a estas notables cualidades en comparación con los materiales de construcción convencionales, se recomienda el MP para aplicaciones en las que se necesitan alta resistencia mecánica, rigidez y resistencia química (reparación y revestimiento de estructuras, elementos prefabricados, canales de transporte de fluidos, etc.) [4].

Las propiedades del mortero polimérico difieren mucho según las condiciones de preparación. Para un tipo dado de mortero polimérico, las propiedades dependen del contenido de aglutinante, la distribución del tamaño del agregado, la naturaleza y el contenido de los rellenos, las condiciones de curado, etc. [5, 6]. Entre las resinas más usadas para la elaboración del MP, se encuentran la resina de poliéster insaturada, las resinas epoxi, las resinas de furano, las resinas de poliuretano y la resina de urea-formaldehído [6], siendo la resina de poliéster insaturada la más usada debido a su bajo costo y fácil procesamiento [7]. Generalmente la dosificación de resina descrita por diversos autores se encuentra en el intervalo de 10 a 20% en peso de mortero polimérico [5, 8–11], el contenido óptimo de resina para un mortero polimérico también depende de la naturaleza del agregado utilizado en el sistema. Se recomienda un contenido más alto de resina cuando se utiliza un agregado fino, debido a la gran superficie de los materiales [6].

Los agregados utilizados se consideran uno de los principales componentes en el MP. En general, más de 75-80% del volumen en el mortero polimérico está ocupado por los agregados [6]. Con el fin de reducir la dependencia de recursos naturales, como la fuente principal de agregado en mortero y concreto, los residuos industriales y urbanos constituyen una opción para la industria de la construcción [12]. Además, el desarrollo sostenible de la construcción implica el uso de materiales no convencionales e innovadores; el reciclaje y reutilización de materiales de desecho para compensar la falta de recursos naturales, es una alternativa para la conservación del medio ambiente. Uno de estos materiales de desecho

que ha sido usado como sustituto de agregado mineral y refuerzo son los desechos de politereftalato de etileno, PET, que mediante un reciclaje mecánico se pueden convertir en partículas o fibras, las cuales sirven de relleno y refuerzo en el mortero y concreto de resina termoestable o base cemento [8, 13–15].

Un inconveniente de los MP, es que tienden a ser más susceptibles a sufrir modificaciones en su estructura debido a los cambios de temperatura, en comparación a los materiales de ingeniería convencionales, y se debe considerar que este material puede estar sometido a altas temperaturas y/o incendios que alterarían su comportamiento mecánico dependiendo de la temperatura y la duración de la exposición. Por lo tanto, es crucial evaluar la estabilidad de los componentes poliméricos cuando son sometidos a temperaturas elevadas.

Recientemente, se ha realizado una considerable cantidad de investigación sobre el comportamiento de los materiales compuestos de matriz polimérica en diferentes tipos de ambientes que están sujetos a cambios de temperatura, porque éste es un problema importante en la aplicación de polímeros termoestables [4, 16–18]. Estos materiales sufren tanto procesos físicos como cambios químicos cuando se aplica calor; esto generalmente resulta en cambios indeseables en las propiedades del material [19]. Por ejemplo, en el mortero polimérico de resina de poliéster, no se recomienda la exposición prolongada a altas temperaturas porque genera la degradación de la misma, lo que posiblemente da lugar a una pérdida de resistencia mecánica [4].

Varios investigadores estudiaron las propiedades físicas y mecánicas de morteros y concretos poliméricos a base de resina de poliéster insaturada, cuando estos son sometidos a temperatura por encima de la temperatura ambiente. Demostrando que los morteros poliméricos tratados a temperaturas por debajo de 110 °C, no se afecta significativamente las propiedades mecánicas totales, aunque las propiedades de flexión parecen ser más susceptibles a la temperatura, que las de compresión [9, 20, 21].

El comportamiento del MP bajo diferentes temperaturas es un parámetro importante a tener en cuenta porque puede, en muchos casos, determinar el límite superior de las temperaturas a las cuales un material tiene propiedades adecuadas de uso. Es por esto que el objetivo de esta investigación es estudiar el efecto de la temperatura sobre las propiedades mecánicas de morteros poliméricos de resina de poliéster insaturada, cuando el agregado mineral es sustituido por porcentajes de partículas de desecho de PET.

## Objetivos

---

El objetivo principal de esta investigación es evaluar el efecto de la temperatura en las propiedades mecánicas de los morteros poliméricos de resina de poliéster insaturada con partículas de desecho de PET como sustituto del agregado natural.

Como objetivos específicos para poder cumplir el propósito de este trabajo se tiene:

- Determinar la cantidad óptima de partículas de desecho de PET a sustituir por agregado mineral en los morteros poliméricos.
- Evaluar el efecto del contenido de partículas de desecho de PET sobre las propiedades mecánicas de los morteros poliméricos sometidos a tratamiento térmico.
- Analizar los cambios causados por la temperatura de tratamiento en la porosidad y densidad de los morteros poliméricos.
- Analizar la interfaz resina/arena/PET de los morteros poliméricos antes y después de los tratamientos térmicos.
- Comparar las propiedades mecánicas de un mortero base cemento Portland con los morteros poliméricos.

# CAPÍTULO I. Uso de polímeros en la industria de la construcción.

---

En el presente capítulo, se proporcionarán algunas definiciones y explicaciones básicas referentes a los polímeros, para poder entender el comportamiento de éstos: cuando son usados en materiales compuestos, ya sea como matriz o como reforzante y posteriormente abordar las aplicaciones de los polímeros como materiales de construcción.

## 1.1. Polímeros. Definición y clasificación.

Según la División Macromolecular de la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC), un polímero es una sustancia compuesta de macromoléculas. Una macromolécula es una molécula grande que consta de hasta de millones de unidades estructurales repetitivas (monómeros) [22], en la Fig. 1.1 se muestra un ejemplo de cómo conforman los monómeros a un polímero [23].

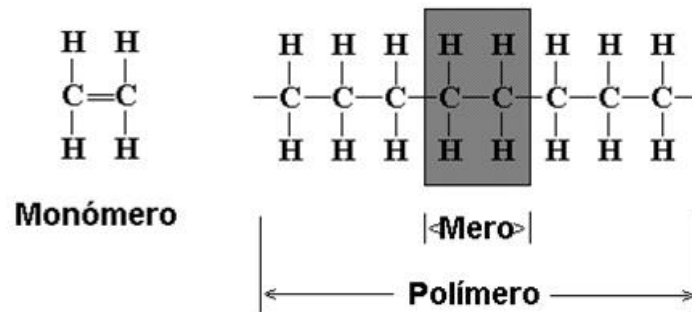


Figura 1.1. Estructura química del etileno (izq.) y el polietileno (der.)

En algunos casos la repetición de las unidades estructurales es lineal (Fig. 1.2a), de forma semejante a como una cadena la forman sus eslabones. En otros casos las cadenas son ramificadas (Fig. 1.2b) o interconectadas formando retículos tridimensionales en las que cada cadena está conectada a todas las demás cadenas mediante una secuencia de puntos de unión, se dice que dichos polímeros están reticulados (Fig. 1.2c) y se caracterizan por su densidad de reticulación, o grado de reticulación, que se relaciona directamente con el número de puntos de unión por volumen [24]. La longitud de la cadena polimérica viene especificada por el número de unidades que se repite en la cadena [25].

Todos los polímeros están unidos mediante enlaces químicos primarios a lo largo de las cadenas (enlaces covalentes entre átomos de carbono) y fuerzas de enlace secundarias de atracción entre moléculas (enlaces débiles de Van der Waals o puentes de hidrógeno), los cuales son débiles en relación con las fuerzas de enlace primarias. Las reticulaciones o enlaces entrecruzados son enlaces covalentes [25, 26]. En la Fig. 1.3 se esquematiza los enlaces primarios y secundarios en un polímero [26].

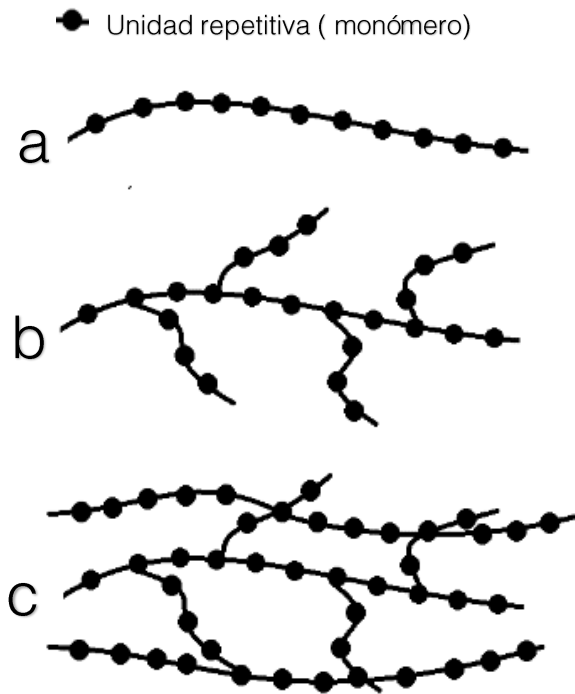


Figura 1.2. Estructura de los polímeros a. Polímeros lineales, b. Polímeros ramificados y c. Polímeros entrecruzados.

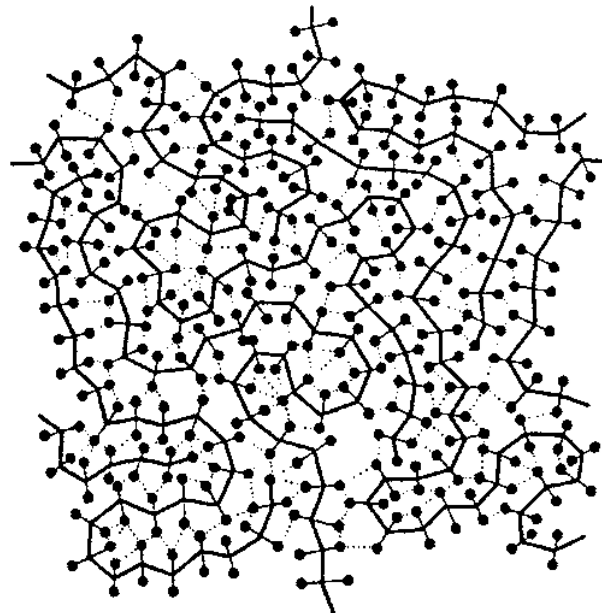
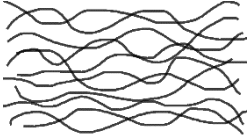

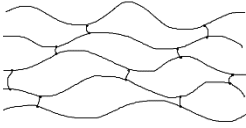


Figura 1.3. Esquema de un polímero amorfo lineal, que muestra los enlaces covalentes fuertes (líneas completas) y los enlaces secundarios débiles (líneas punteadas).

### 1.1.1. Clasificación de los polímeros.

La clasificación de los polímeros de acuerdo a su comportamiento mecánico y térmico se describe en la Tabla 1.1, donde se separan en tres grupos: termoplásticos, termoestables y elastómeros.

Tabla 1.1. Clasificación de los polímeros.

Polímero	Estructura general	Diagrama
Termoplástico	Cadenas lineales flexibles	
Termoestable	Red rígida tridimensional	
Elastómero	Cadenas lineales con enlaces cruzados	

#### a) Termoplásticos

Los polímeros termoplásticos normalmente se denominan plásticos, son polímeros lineales o ramificados que se vuelven líquidos con la aplicación de calor. Al calentar los polímeros termoplásticos, se reblandecen: los enlaces secundarios que unen las moléculas entre sí se funden de manera que fluye como un líquido viscoso, es por esto que se puede moldear y conformar en cualquier forma cuando se calienta, comúnmente se comportan de una manera plástica y dúctil. Generalmente, los termoplásticos no cristalizan fácilmente al enfriarse al estado sólido porque esto requiere un ordenamiento considerable de las macromoléculas altamente enrolladas y enredadas presentes en el estado líquido. Aquellos que cristalizan, no forman materiales perfectamente cristalinos, sino que son semicristalinos con regiones tanto cristalinas como amorfas. Las fases cristalinas de dichos polímeros se caracterizan por su temperatura de fusión  $T_m$ , por encima de la cual dichos polímeros se pueden convertir en artefactos mediante técnicas convencionales de procesamiento de polímeros tales como extrusión, moldeo por inyección y moldeo por compresión [24, 26, 27].

Diversos polímeros termoplásticos son, sin embargo, completamente amorfos e incapaces de presentar una cristalización, incluso después de un calentamiento (recocido). Los polímeros amorfos (y las fases amorfas de polímeros semicristalinos) se caracterizan por su temperatura de transición vítrea  $T_g$ , temperatura a la cual la transformación se produce abruptamente desde el estado vítreo (duro) al estado gomoso (suave), en esta temperatura el polímero recibe la energía térmica suficiente para que sus cadenas experimenten un cierto desplazamiento relativo; a medida que esta energía aumenta (es decir, se produce un aumento de temperatura) este desplazamiento se intensifica, hasta que finalmente el polímero funde; debajo de  $T_g$ , las cadenas de polímero no pueden moverse y están "congeladas" en su posición. Tanto la  $T_m$  como la  $T_g$  son mayores al aumentar la rigidez de la cadena y al aumentar las fuerzas de atracción intermolecular [24]. Algunos ejemplos de polímeros termoplásticos son polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS), politereftalato de etileno (PET), entre otros [26].

#### **b) Termoestable**

Los polímeros termoestables o termofijos son aquéllos polímeros que se vuelven irreversiblemente duros bajo la influencia del calor, de la luz, de agentes fotoquímicos y de agentes químicos, pasando de un material fusible y soluble a otro no fusible e insoluble, por la formación de un retículo tridimensional covalente. Este endurecimiento o curado implica un cambio químico [28].

Este proceso de curado involucra invariablemente una polimerización, que conecta las moléculas lineales entre sí para formar una sola macromolécula, se suele presentar en dos etapas: en la primera, se produce la polimerización parcial, formando cadenas lineales, mientras que, en la segunda, el proceso se completa entrelazando las moléculas. Las cadenas poliméricas (reactivos termoplásticos o líquidos) reaccionan entre sí y, a la vez, con un agente de reticulación, generalmente un monómero de vinilo, formando macromoléculas orientadas en todas direcciones y con numerosos enlaces covalentes entre ellas; debido a estos enlaces entrecruzados, la estructura es casi siempre amorfa.

El retículo tridimensional formado confiere al material curado unas propiedades mecánicas, térmicas y de resistencia química muy elevadas que lo hacen apto para múltiples aplicaciones, pero a expensas de un comportamiento relativamente frágil debido a una alta densidad de reticulación. La reacción de curado es irreversible, de forma que el polímero



resultante no puede ser reciclado, ya que si se incrementa la temperatura el polímero no funde, sino que alcanza su temperatura de degradación [24, 26, 29, 30].

### c) Elastómeros

Los elastómeros son polímeros de caucho reticulados (es decir, redes elásticas) que se pueden deformar fácilmente a extensiones elevadas (por ejemplo, se pueden alargar de 3 a 10 veces sus dimensiones originales) y recuperan rápidamente su tamaño original cuando se libera el esfuerzo aplicado. Esta propiedad es un reflejo de su estructura molecular en la cual la red tiene baja densidad de reticulación. Las cadenas poliméricas gomosas se tensan al producirse la deformación, pero evitan el flujo permanente por los enlaces cruzados y vuelven a su posición original al eliminar la tensión. El término caucho, usualmente utilizado en lugar de elastómero, preferiblemente debe usarse para describir polímeros elásticos que no están reticulados [24, 26].

La mayoría de los elastómeros obtienen sus propiedades finales al añadirles rellenos triturados, auxiliares de procesamiento, antioxidantes, agentes de curado y otros, seguidos de una vulcanización (curado) a temperaturas elevadas que reticulan las cadenas moleculares y los hace ser sistemas termoestables. En la vulcanización, la reticulación del polímero elastomérico se logra mediante una reacción química irreversible normalmente a altas temperaturas y usualmente implica la adición de compuestos de azufre (S). Los átomos de S son los que forman los enlaces cruzados del retículo. Los elastómeros son termoestables debido a la reticulación [24, 31]. Entre los elastómeros se encuentra el poliisopreno, polibutadieno y policloropreno [26].

## 1.2. Fundamentos de morteros modificados con polímeros.

En la actualidad se ha ido incrementando el uso y consumo de materiales poliméricos en elementos para la industria de la construcción. Una de las aplicaciones de mayor interés es su uso como componente en morteros y concretos, ya sea parcial o totalmente.

En la categoría de compuestos de cemento-polímero, el mortero y concreto de cemento-polímero o modificado con polímeros se preparan reemplazando parcialmente los aglutinantes cementosos del mortero o concreto convencional con polímeros, es decir, aditivos poliméricos o modificadores de cemento, fortaleciendo así los aglutinantes con los polímeros, o reemplazados totalmente como en el mortero polimérico (MP) y concreto polimérico (CP), donde el cemento se ha retirado en su totalidad para dar paso a las resinas

termoestables como medio de unión entre los agregados. A continuación, se abordan los principales materiales compuestos a base de polímeros usados en la industria de la construcción.

### 1.2.1. Mortero o concreto de cemento Portland.

Aunque los términos "cemento" y "concreto" se usan a menudo indistintamente, el cemento es en realidad un ingrediente del concreto. Los cementos son aglutinantes en concretos y morteros, este elemento es el principal responsable de las fuerzas adhesivas, que mantienen unidos los demás componentes [32]. El concreto es un material similar a una roca artificial, básicamente es una mezcla de agregado grueso (grava o piedra triturada), agregado fino (arena), cemento y agua, ver Fig. 1.4; el mortero es fabricado de los mismos componentes del concreto a excepción que no incluye agregado grueso.

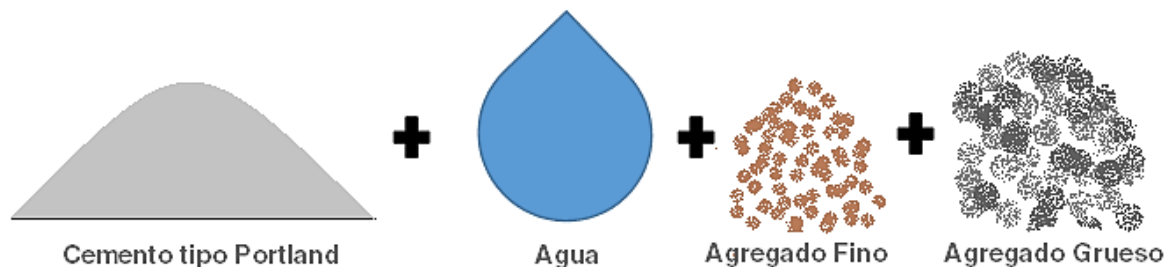
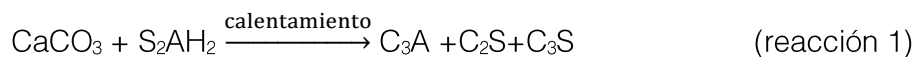


Figura 1.4. Componentes del concreto.

Existe una gran variedad de cementos, pero el más usado es el tipo Portland [33]. El término Portland es usado para describir una variedad de conglomerantes. Se les denominan "cementos hidráulicos", debido a que se fijan y endurecen al reaccionar químicamente con agua a través de una hidratación [34]. La pasta de cemento Portland endurecida es predominantemente una estructura aglomerada de silicatos y aluminatos de calcio unidos entre sí por fuerzas de Van der Waals relativamente débiles [35]. Estos enlaces se ven favorecidos, debido a la afinidad química entre el agregado fino que es regularmente arena de  $\text{SiO}_2$  y los silicatos contenidos en la pasta del cemento.

Para comprender el proceso de hidratación del cemento, a continuación se presenta las reacciones principales, se usará una denominación abreviada de los cuatro componentes básicos del cemento [26]: óxido de calcio o cal viva,  $\text{CaO} \rightarrow \text{C}$ ; óxido de silicio o sílice,  $\text{SiO}_2 \rightarrow \text{S}$ ; óxido de aluminio o alúmina,  $\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{A}$  y agua,  $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}$ . Los diversos tipos de cemento Portland se fabrican por calentamiento a temperaturas de 1400-1650 °C a partir de

mezclas controladas de caliza, la cual está compuesta mayoritariamente por carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>) y arcilla, constituida por agregados de silicatos de aluminio hidratados (S<sub>2</sub>AH<sub>2</sub>). Los productos después del calentamiento, en nomenclatura abreviada son:



Donde C<sub>3</sub>A es aluminato tricálcico, C<sub>2</sub>S es silicato bicálcico y C<sub>3</sub>S es silicato tricálcico. Esta mezcla se denomina “clinker”; el clinker es molido para producir el cemento [34].

Dos reacciones tienen lugar durante la hidratación del cemento Portland. La primera es rápida y hace que se fije el cemento, es la hidratación del C<sub>3</sub>A:



La segunda es más lenta y es donde la pasta de cemento se endurece. Es la hidratación de C<sub>2</sub>S y C<sub>3</sub>S formando gel de tobermorita (C<sub>3</sub>S<sub>2</sub>3H), el principal material de unión que ocupa el 70% de la estructura [26, 33]:



El mortero y el concreto fabricado con cemento Portland han sido un material de construcción popular en el mundo durante más de 170 años. Sin embargo, el mortero y concreto de cemento tienen algunas desventajas, tales como endurecimiento retardado, gran contracción por secado y baja resistencia química. Para reducir estas desventajas, se han realizado intentos de introducir polímeros en su composición. Uno de estos intentos es el mortero y concreto modificado con polímeros o mortero y concreto polimérico, que se fabrica modificando el mortero y concreto de cemento con polímeros tales como látex, polvos poliméricos redispersables en agua, polímeros solubles en agua y resinas líquidas [36].

### 1.2.2. Concreto impregnado de polímero.

El concreto impregnado de polímero, PIC, (por sus siglas en inglés, *Polymer Impregnated Concrete*) es un concreto de cemento Portland hidratado que ha sido impregnado con un monómero de baja viscosidad, usualmente metacrilato de metilo, que posteriormente se polimeriza *in situ* mediante técnicas de radiación o técnicas catalíticas térmicas, que implican el uso de iniciadores químicos y aplicación de calor [2, 37]; la razón principal para la impregnación es mejorar las características de resistencia del concreto.

En general, casi cualquier forma, tamaño, configuración y calidad del concreto de cemento Portland endurecido se puede impregnar hasta cierto punto con monómero, siempre que el monómero tenga acceso al espacio vacío dentro del concreto, es decir la porosidad de la pasta de cemento que representa el espacio no llenado por los componentes sólidos de la pasta de cemento hidratado [38]. Una porción sustancial de este espacio se obtiene usualmente eliminando los residuos de agua libre de los poros en el concreto secándolo mediante calentamiento [2], en la Fig. 1.5 se esquematiza el procedimiento para la impregnación del concreto.

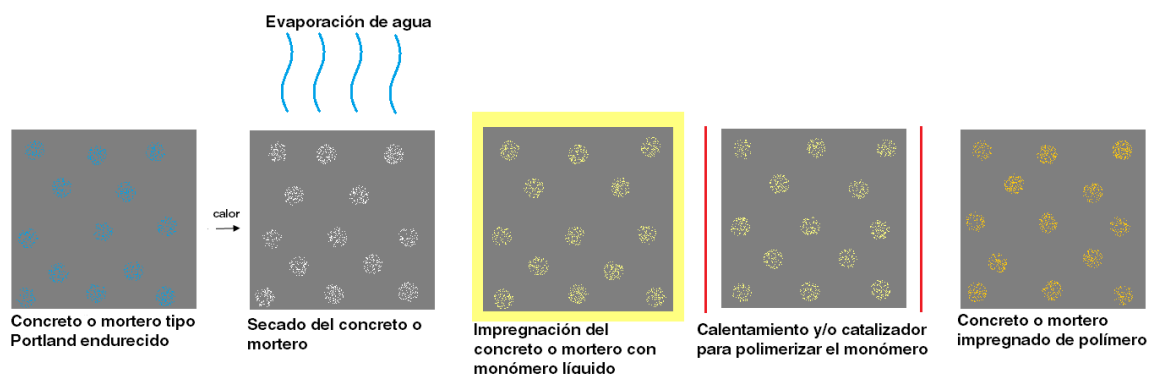


Figura 1.5. Procedimiento para la impregnación del concreto con monómero.

El monómero se introduce en el concreto por inmersión a la presión atmosférica o vaciando en la superficie para que penetre naturalmente en el concreto. El grado en el cual el espacio disponible en el concreto está ocupado por monómero después de la impregnación determina si el concreto está parcialmente o totalmente impregnado. La impregnación total, implica llenar con polímero aproximadamente el 85% del espacio vacío disponible después del secado, mientras que la impregnación parcial consiste en un proceso en el que el concreto se impregna sólo a una profundidad limitada por debajo de la superficie, con el fin de crear una capa protectora en el concreto. Después de la impregnación, el concreto que contiene la cantidad deseada de monómero se somete a un tratamiento para convertir el monómero en un polímero, mediante una reacción de polimerización [2].

El PIC desarrolla resistencias a la compresión tres a cuatro veces mayores que el concreto del cual fue hecho, de igual manera se presentan aumentos en resistencia a la tracción y flexión, y cuenta con excelente durabilidad, particularmente a ciclos de hielo-deshielo y resistencia ácida, debido a una permeabilidad extremadamente baja [37]. Con estas propiedades sobresalientes, entre las aplicaciones para PIC, se incluyen cubiertas de

puentes, tuberías y conductos para fluidos agresivos, azulejo para suelos, revestimientos para edificios, contención de residuos peligrosos y vigas [37].

### 1.2.3. Concreto modificado con polímeros.

El concreto modificado con polímeros, PMC, (por sus siglas en inglés, *Polymer modified concrete*) también llamado concreto de cemento Portland-polímero, PPCC, (*Polymer portland cement concrete*) o concreto modificado con látex, LMC, (*Latex-Modified Concrete*), es definido por el Instituto Americano del Concreto (ACI por sus siglas en inglés) como un cemento Portland y agregado combinado en el momento de la mezcla con polímeros orgánicos que se dispersan o redispersan en agua [35]. La Fig. 1.6 muestra los pasos de la modificación del concreto.

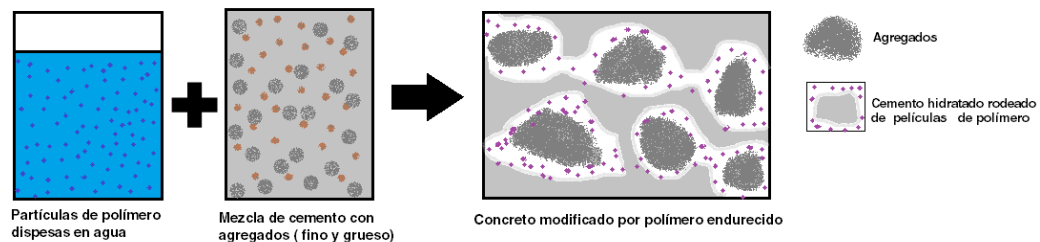


Figura 1.6. Preparación de mortero modificado con polímeros.

El polímero orgánico se suministra en tres formas: como una dispersión en agua que se denomina látex, donde las partículas de látex son típicamente mayores de 100 nm de diámetro; como un polvo redispersable, los cuales se redispersan ya sea en agua o durante el mezclado con el cemento, el tamaño de la partícula varía de 50 a 5000 nm, los polvos poliméricos redispersables son emulsiones poliméricas, cuando se mezclan con agua, estos aglutinantes orgánicos en polvo se pueden volver a dispersar en agua en nuevas emulsiones con propiedades esencialmente idénticas a las emulsiones de copolímeros originales [35]; o como un líquido que es dispersable o soluble en agua [4, 5]. En la Tabla 1. 2 se enlistan los diversos polímeros que se han utilizado como modificadores en cementos hidráulicos, además de la presentación en la cual se suministran [35, 36].

Tabla 1.2. Polímeros modificadores de cemento.

<b>Látex polimérico</b>	Látex elastomérico	Látex de caucho natural	
		Látex de caucho sintético	Caucho Estireno-Butadieno (SBR)
			Caucho de cloropreno (CR) (neopreno)
			Caucho de metacrilato-butadieno de metilo (MBR)
	Caucho de Acrilonitrilo-Butadieno (NBR)		
	Látex termoplástico	Éster poliacrílico (PAE)	
		Poliacetato de etileno-vinilo (EVA o VAE)	
		Poliéster de estireno-acrílico (SAE)	
		Acetato de polivinilo (PVAC)	
		Propionato de polivinilo (PVP)	
		Polipropileno (PP)	
	Policloruro de vinilideno-cloruro de vinilo (PVDC)		
	Látex termoestable	Epoxi (EP)	
	Látex bituminoso	Asfalto	
		Asfalto de caucho	
Alquitrán de hulla			
Parafina			
Mezcla de Látex *			
<b>Polvos de polímeros redispersables</b>	Polvos elastoméricos	Caucho Estireno-Butadieno (SBR)	
	Polvos termoplásticos	Poliacetato de etileno-vinilo (EVA)	
		Poliacetato de vinilo-versatato de vinilo (VA / VeoVa)	
		Poliéster estireno-acrílico (SAE)	
		Éster poliacrílico (PAE)	
<b>Polímeros solubles en agua</b>	Derivados de celulosa	Metil celulosa (MC)	
		Carboximetil celulosa (CMC)	
		Hidroxietil celulosa (HEC)	
	Alcohol polivinílico (PVA, poval)		
	Óxido de polietileno		
	Poliacrilamida		

\* Mezcla de Látex: son mezclas de diferentes tipos de látex, como un látex elastomérico con látex termoplástico. Aunque estas mezclas se usan ocasionalmente para modificar el cemento, la práctica es limitada.

Dos procesos rigen la modificación de mezclas de cemento hidráulico con polímeros: la hidratación del cemento y la coalescencia del polímero [35]. Conforme se hidrata el cemento, las partículas de polímero se unen formando una película de polímero que se entreteje en el cemento hidratado (coalescencia del polímero), dando como resultado una co-matriz de cemento hidratado y una película de polímero a lo largo de la mezcla endurecida de cemento, ya que las partículas de polímero se concentran en los espacios vacíos, ver Fig. 1.6 [2].

Las proporciones de la mezcla de los morteros modificados con polímero se encuentran en el intervalo de la relación cemento-agregado fino = 1: 2 a 1: 3 (en peso), la relación polímero-cemento de 5 a 20% y la relación agua-cemento de 30 a 60%, dependiendo de la trabajabilidad requerida [35, 36]; por trabajabilidad se refiere a la facilidad o dificultad relativa de colocar y consolidar el concreto [14].

El PMC se utiliza en la reparación de pisos industriales y comerciales que están sujetos a deterioro por abrasión, vibraciones, derrames y condiciones agresivas, en revestimientos a cubiertas de buques para proporcionar una superficie antideslizante, parcheo de concreto y una superficie protectora al acero [35].

#### 1.2.4. Concreto polimérico.

El concreto polimérico, PC, (por sus siglas en inglés, *Polymer concrete*) es un material compuesto en el que el agregado está unido en una matriz con un aglutinante polimérico. Este tipo de concreto no contiene una fase de cemento hidratado, aunque el cemento Portland puede utilizarse como agregado o relleno [2]. En la preparación de concreto polimérico se podrían utilizar diferentes tipos de resina, es decir, resina termoplástica, termoestable o de elastómero. Sin embargo, en la industria de la construcción, las resinas termoestables líquidas son las más utilizadas por ser un aglutinante polimérico técnicamente adecuado y económico [36, 39].

Las resinas termoestables a emplear como aglutinante en los PC, han de poder curar (proceso de polimerización) a temperatura ambiente, aunque los procesos puedan acelerarse o regularse mediante la ayuda de calor, por radiación y/o por la acción de sustancias activadoras/reguladoras de la polimerización [40], como se puede ver en la Fig. 1.7.

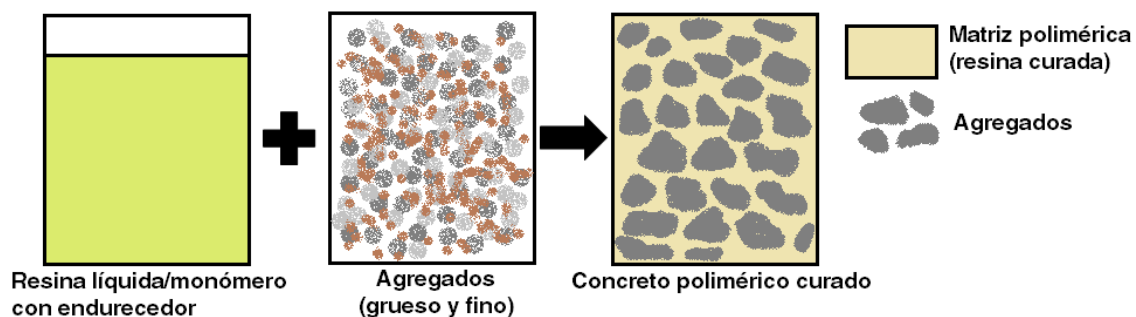


Figura 1.7. Preparación de concreto polimérico.

Entre las resinas más comúnmente utilizadas para el concreto polímero se encuentran las resinas de poliéster insaturadas (sistema poliéster-estireno), metacrilato de metilo, resinas epoxi, resinas de furano, resinas de poliuretano y resinas de urea-formaldehído [6, 37]; aunque la selección de estas resinas depende de aplicaciones específicas. Generalmente las resinas de poliéster insaturadas son las resinas más usadas en los concretos poliméricos debido a su bajo costo en comparación a otras resinas poliméricas (epóxicas, látex, etc.), fácil disponibilidad, fácil manejo, facilidad de pigmentación, compatibilidad con diferentes tipos de relleno y capacidad de reforzarse en estado líquido con fibras, así como buenas propiedades mecánicas después del curado, resistencia química y adhesión [6, 39, 41–45]. Estas propiedades dependen del contenido de aglutinante, la distribución del tamaño del agregado y las condiciones de curado [2, 6].

Se han elaborado concretos y morteros poliméricos con diferentes proporciones de resina termoestable/agregado; la dosis de resina reportada por varios autores se encuentra principalmente entre 10 a 20% en peso de concreto polimérico [16], aunque los más comunes contienen 20% en peso de resina y 80% en peso de agregados minerales [6, 8, 46].

Para la preparación de concreto polimérico con resinas de poliéster insaturadas, éstas resinas se suelen disolver con un agente de reticulación, el estireno es el monómero comúnmente utilizado debido a su compatibilidad, facilidad de uso y costo, este regula la reacción de reticulación y asegura una buena procesabilidad [47]; aunque también pueden usarse otros reticulantes comercialmente importantes que incluyen ésteres vinílicos, dimetacrilato y divinilbenceno [43]. Para curar la resina de poliéster insaturada implica un proceso de polimerización por radicales libres, el cual puede tomar lugar a temperatura ambiente, en el cual se usan predominantemente un iniciador de peróxido orgánico que al descomponerse, generan radicales libres que reaccionan con el poliéster y el estireno, y una



sal de cobalto o una amina aromática como acelerador o promotor, que es una sustancia reductora que descompone el iniciador, incluso a baja temperatura [43, 48]. También se suelen reticular a temperaturas elevadas, empleado sistemas de iniciación adecuados y sometiendo la resina a temperaturas por encima de 70 °C [43, 49].

Entre las propiedades de los PC, se encuentran un rápido curado a temperatura ambiente de -18 a +40 °C, alta resistencia a la tracción, flexión y compresión, buena adhesión a la mayoría de las superficies, buena durabilidad a largo plazo con respecto a los ciclos de hielo-deshielo, baja permeabilidad al agua y soluciones agresivas y buena resistencia química. Debido a estas propiedades, algunas de las aplicaciones en donde se han empleado estos compuestos son, en materiales de parcheo para concreto de cemento Portland, capas protectoras antideslizantes, superficies de desgaste sobre el concreto, contenedores de desechos peligrosos, paneles estructurales y decorativos para la construcción, tuberías de alcantarillado, bóvedas de equipos, canales de drenaje, revestimientos en tuberías de acero al carbono para aplicaciones geotérmicas, piscinas y cubiertas de terrazas [2, 16].

A pesar de estas ventajas, los concretos poliméricos presentan desventajas que han limitado su utilización mundial. Estas desventajas pueden ser [4, 42, 50]:

1. Su limitado desempeño frente a las altas temperaturas; las resinas que actúan como aglutinante en el concreto polimérico son compuestos orgánicos, por lo que son más susceptibles al calor que los materiales inorgánicos como el cemento. Por esta razón, no se recomienda una exposición prolongada a altas temperaturas ya que generaría la degradación de la resina y como consecuencia, una pérdida en la resistencia mecánica.
2. La resina de poliéster insaturada es un polímero termoestable caracterizada por su estructura altamente reticulada, lo que le aporta una baja elasticidad y una fragilidad característica.
3. Las medidas apropiadas que deben aplicarse para lograr una adecuada colocación del concreto polimérico.
4. El costo elevado de las resinas utilizadas como agentes aglutinantes.

Con el fin de reducir los altos costos del concreto polimérico y además, junto con la reciente preocupación ambiental por los desechos plásticos que terminan en vertederos, varias investigaciones se han llevado a cabo para analizar las propiedades de los concretos

poliméricos con subproductos industriales y residuos plásticos que actúan como agregados [32, 33, 51], los cuales modifican sus propiedades mecánicas, físicas e incluso térmicas [12].

### 1.3. Aplicación de residuos plásticos en concretos y morteros.

Desde el siglo XX, se ha incrementado el consumo de los materiales poliméricos en una gran gama de productos debido a sus propiedades, como baja densidad, alta relación de resistencia-peso, facilidad de diseño y fabricación, alta durabilidad y bajo costo. Actualmente son ampliamente utilizados en casi todos los campos, en particular en el empaquetado, edificación y construcción, automotriz, electricidad y electrónica, agricultura y otras industrias [15]. El consumo de estos productos ha contribuido en gran medida a la producción de una abundante cantidad de residuos sólidos y al tratarse de residuos no biodegradables generan enormes impactos ambientales [13, 15].

Los residuos plásticos generados pueden ser tratados por tres métodos principales: (i) depositados en un relleno sanitario, (ii) incineración y (iii) reciclaje según el principio de la jerarquía de residuos [52]. El relleno sanitario se considera ahora el último recurso en el tratamiento de los residuos plásticos, ya que requiere una gran cantidad de espacio y causa problemas de contaminación a largo plazo. La incineración se adopta en algunos países debido al alto poder calorífico del polímero y porque los residuos se eliminan por completo. Sin embargo, se libera una gran cantidad de dióxido de carbono y productos químicos tóxicos [13].

Debido al crecimiento desmedido de los residuos plásticos, se ha generado una búsqueda de medios alternativos de reciclado, que ofrezcan una mejor solución para reducir el impacto ambiental. La reutilización de estos desechos en la industria de la construcción parece ser una ruta viable para contribuir tanto a la prevención de la contaminación ambiental como al diseño de edificios económicos. El uso creciente de residuos en la industria de la construcción ha incrementado el interés hacia el reciclaje de residuos plásticos, explotando sus propiedades tales como peso ligero, durabilidad, resistencia a productos químicos, etc. [53]. Con el fin de desarrollar materiales compuestos innovadores y sostenibles, se ha realizado un extenso trabajo sobre el uso de residuos plásticos como agregados o rellenos en la fabricación de concreto. Entre los polímeros utilizados se encuentran el politereftalato de etileno (PET) [8, 12, 13, 54, 55], el cloruro de polivinilo (PVC) [56], el polietileno de alta densidad (HDPE) [57, 58], resinas termoestables [59], el polietileno (PE) [60], Bakelita [61],

espumas de poliestireno expandido (EPS) [62, 63], residuos de neumático (contienen caucho natural mezclado con caucho de estireno-butadieno (SBR), o caucho de polibutadieno (BR) [64–66], policarbonato [67], espumas de poliuretano [68] y fibras de polipropileno [69].

Estos desechos se utilizan en el concreto principalmente en dos formas: agregados de plástico (partículas) que reemplazan a los agregados naturales y fibras de plástico (refuerzos), que se utilizan en el concreto armado [15]; esto mediante un reciclaje mecánico, es decir, procesos que implican la fusión, trituración o granulación de estos residuos plásticos [53].

En general, las partículas o las fibras se utilizan como refuerzos en compuestos, y su efectividad depende de su tamaño, concentración, distribución y relación longitud/diámetro; tales refuerzos se utilizan para aumentar la rigidez, la resistencia a la abrasión, la resistencia mecánica y el rendimiento de la temperatura [46].

En la Tabla 1.3 se muestran los tamaños, formas y tipos de partículas de desechos poliméricos utilizados por diversos autores en la elaboración de concretos poliméricos. Los resultados expuestos en la Tabla 1.3, muestran la factibilidad de la reutilización de residuos como sustitutos parciales de agregados en materiales compuestos [54], además la incorporación de diversos tipos de agregados de plástico puede mejorar el comportamiento de permeabilidad del concreto, generando que el concreto que contiene agregado de plástico sea más duradero frente a ataques químicos agresivos [57]. Los desechos plásticos también pueden usarse con cierta eficacia como reemplazo parcial de los agregados inorgánicos en aplicaciones de concreto para disminuir el peso muerto de las estructuras [53], reduce la densidad aparente del concreto directamente proporcional al contenido de agregados plásticos, creando concreto ligero [59]. El uso de fibras de plástico reciclado da como resultado una mejora significativa en la resistencia a la compresión del concreto [15] y mejora considerablemente la resistencia al impacto del concreto [53].

Tabla 1.3. Tamaños, formas y tipos de partículas de desechos poliméricos utilizados por diversos autores en la elaboración de concretos poliméricos.

Autor	Plástico	Porcentaje en peso de sustitución	Forma/tamaño (mm) del agregado plástico
Frigione (2010)	PET	5	irregular/0.1-5
Reis et al.(2011)	PET	5,10,15 y 20	irregular/0.1-5
Reis et al. (2012)	PET	5	irregular/0.1-5
Miranda Vidales et al. (2014)	PET	2,5	Partículas/ 5x5
Ge et al. (2014)	PET	30	hojuelas/ sin especificar
Hannawi et al. (2010)	PET/PVC	3,10,20 y 50	irregular/5
Kou et al. (2009)	PVC	5,15,30 y 45	irregular/1-10

Sin embargo, se presentaron ciertas desventajas al usar residuos poliméricos, la resistencia a la compresión disminuyó con el aumento del contenido de plástico reciclado; en general, los resultados mostraron una disminución en la resistencia a la compresión a medida que aumentaba la cantidad de polímero añadido al concreto [53, 54, 57, 61]. Un aumento en el contenido de residuos plásticos conduce al deterioro de las propiedades mecánicas del concreto, por ejemplo la reducción de la resistencia a la compresión fue entre 34% y 67% para concreto que contenía 10-50% de plástico reciclado [53]. Además, a mayor contenido de desechos plásticos, la porosidad aparente y la absorción de agua parecen aumentar con el contenido de plástico [67], por esto se recomienda usar la mínima cantidad de desecho plástico.

Otra alternativa de emplear residuos plásticos en la industria de la construcción, es aplicando un reciclaje químico en desechos de PET para producir resina de poliéster insaturada. Este proceso de reciclaje químico (depolimerización), involucra la fragmentación de la cadena polimérica del polímero [8], esto puede llevarse a cabo en residuos de PET mediante los procesos de metanólisis, glicólisis o hidrólisis. Durante la metanólisis, los residuos de PET se tratan con metanol a altas presiones (superior a 2 atm) para recuperar los monómeros iniciales, en la glicólisis se disuelve poliéster en etilenglicol en ebullición y presión atmosférica y en la hidrólisis se puede llevar a cabo con agua, ácido o álcali a presión entre 1 a 2 atm [70–72]. Por medio de la depolimerización, se produce el monómero de bis-hidroxietyl tereftalato (BHET), que se ha utilizado en la producción de resina de poliéster insaturada, la cual se puede emplear como aglutinante para la producción de concreto o mortero polimérico [8, 70, 73], ya que estudios anteriores han demostrado que es posible utilizar la resina

obtenida a partir de botellas de PET como un aglutinante para producir concreto o mortero polimérico de buena calidad [8, 10, 43, 47, 51, 53, 73]. El concreto polimérico de resina basado en PET reciclado puede emplearse para producir elementos prefabricados de concreto con suficiente resistencia mecánica para usarse en aplicaciones tales como pavimentos, barreras de contención y tuberías de alcantarillado [10].

El uso de concreto polimérico con resinas de poliéster insaturadas basadas en PET reciclado puede ayudar a reducir el costo de los productos de concreto polimérico, ahorrar energía y disminuir el problema de los residuos sólidos que representan los plásticos [44].

#### **1.4. Degradación en polímeros.**

Una función clave para el uso exitoso de un nuevo material en ambientes severos es la durabilidad mecánica y térmica, las cuales son propiedades importantes para un material que se utiliza en la industria de la construcción, se definen como la capacidad de una estructura para retener sus propiedades físicas y químicas después de un daño mecánico y después de la exposición a condiciones térmicas severas [16].

Todos los polímeros modifican su composición original transcurrido un cierto período de tiempo; estas modificaciones son favorecidas por la acción aislada o combinada de factores térmicos, químicos, mecánicos y radiactivos, ya que puede generar una degradación en los materiales poliméricos.

La degradación es un proceso químico que afecta no sólo a la composición química del polímero sino también a los parámetros físicos, el resultado puede ser endurecimiento, fragilidad, ablandamiento, agrietamiento, decoloración y pérdida de peso molecular en el polímero, estos cambios repercuten en sus propiedades y prestaciones iniciales [71, 74]. La pérdida de peso molecular puede ser tan grave que el polímero se degrada a una mezcla de monómeros y oligómeros (un oligómero es una sustancia compuesta de solo unas pocas unidades monoméricas unidas repetitivamente entre sí, tales como un dímero, trímero, tetrámero, etc. [75]). Es por esto que la degradación puede considerarse como un tipo de modificación de la cadena polimérica, ya que la degradación se produce debido a los cambios que acompañan a la cadena principal o cadenas laterales (ramificaciones) y grupos funcionales del polímero. Otros efectos que pueden presentarse son ennegrecimiento o carbonización y pérdida de propiedades mecánica [28, 76].

Los procedimientos de degradación se basan en la acción por:

- el calor; degradación térmica
- la atmósfera; degradación oxidativa
- la humedad; degradación hidrolítica
- la luz; fotodegradación

**Degradación térmica.** Las reacciones de termodescomposición o degradación térmica se pueden producir en ausencia de oxígeno (pirólisis) o en presencia de éste (termo-oxidación). La tendencia de los polímeros a experimentar reacciones de tipo pirolítico tiene relación con las energías de enlace asociadas a su composición química y para que ocurran es necesario alcanzar niveles de temperatura relativamente elevados, para generar una ruptura de enlaces covalentes [74].

Este proceso de descomposición puede ocurrir en cadena (depolimerización en cadena) o al azar (escisión aleatoria), el mecanismo que predomina depende del tipo de polímero y la temperatura de degradación del polímero [76]:

- a) En la depolimerización en cadena, también conocida como despropagación en cadena o "descompactación" (*unzipping*), una cadena principal dada se reduce en longitud por la eliminación secuencial de unidades monoméricas que se encuentran en los extremos terminales del polímero donde las unidades de monómero son liberadas sucesivamente o en los "enlaces débiles". Un "enlace débil" puede ser un defecto en la cadena. La depolimerización en cadena presenta tres rasgos característicos: (1) el producto principal (volátil o no) es un monómero, (2) la disminución del peso molecular del polímero es inicialmente insignificante y (3) la velocidad de conversión disminuye gradualmente [76].

La depolimerización implica una combinación de algunos o todos los siguientes pasos de reacción [19, 77]:

Iniciación. La depolimerización comienza con la fragmentación homolítica de los átomos en la cadena principal mediante la escisión al azar o la escisión de la cadena final.

1.  $P_n \rightarrow R_r + R_{n-r}$  (escisión aleatoria)
2.  $P_n \rightarrow R_{n-1} + R_1$  (escisión de cadena final)

donde  $P_n$  es una molécula polimérica de grado de polimerización  $n$  y  $R_r$  es un radical polimérico de longitud  $r$ .

Propagación. Las reacciones de propagación de la depolimerización a menudo se llaman reacciones de despropagación. Hay tres tipos diferentes:

1.  $R_n \rightarrow R_{n-r} + R_r$  (transferencia intramolecular de H)
2.  $R_n \rightarrow R_{n-1} + M$  (descompresión)
3.  $R_s + P_n \rightarrow P_s + R_{n-r} + P_r$  (transferencia Intermolecular H)

La descompresión produce monómeros, mientras que la transferencia de hidrógeno intermolecular e intramolecular suele dar como resultado fragmentos de tamaño superior al de las unidades del monómero.

Terminación. Las tres reacciones de terminación más comunes son:

1.  $R_n \rightarrow P_n$  (terminación unimolecular)
2.  $R_r + R_s \rightarrow P_r + s$  (recombinación)
3.  $R_r + R_s \rightarrow P_r + P_s$  (desproporción)

b) En la escisión aleatoria, la ruptura de la cadena se produce en puntos aleatorios a lo largo de la cadena, ver Fig. 1.8 [78]. La escisión aleatoria presenta los siguientes rasgos característicos: (1) los productos principales son fragmentos típicos de monómero, dímero, trímero, etc., hasta pesos moleculares de varios cientos; (2) la disminución en el peso molecular es inicialmente apreciable; y (3) la velocidad de degradación es inicialmente rápida y se alcanza un máximo.

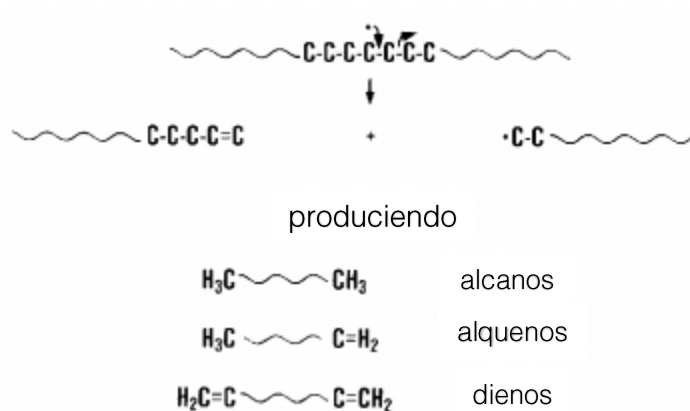


Figura 1.8. Mecanismo de escisión aleatoria de una cadena polimérica

Estos dos tipos de reacciones pueden ocurrir separadamente o en combinación. Asimismo, pueden ser iniciadas térmicamente o por la energía radiante u otro tipo de agente externo como el  $O_2$  [28].

**Degradación oxidativa.** Los gases atmosféricos pueden provocar cambios químicos. Dentro de estos destaca la acción del oxígeno en combinación con la temperatura (termo-oxidación) o con la luz (fotooxidación) [74].

Para que una molécula de polímero sea atacada por oxígeno, debe entrar en contacto con ella. Esto significa que el oxígeno debe poder penetrar en el material. De lo contrario, toda la oxidación ocurrirá solo en la superficie. Se demostró que la oxidación se produce más fácilmente en las regiones amorfas de los polímeros, debido a que en las regiones cristalinas la permeabilidad de oxígeno se ve obstaculizada por el hecho de que las cadenas se empaquetan, esto a temperaturas por debajo de  $T_m$  del polímero [28].

Los procesos de oxidación de los polímeros siguen un mecanismo en etapas de tipo radicalaria o reacción por radicales libres. La primera etapa (iniciación) es promovida por una fuente de energía (térmica o radiante). Los radicales libres así formados experimentan sucesivos procesos de oxidación en la etapa de propagación; como consecuencia, se forman peróxidos e hidroperóxidos, ambos inestables. Finalmente, en la etapa de terminación, estas especies químicas reaccionan entre sí y dan lugar a productos estables [74].

**Degradación hidrolítica.** La degradación hidrolítica de un polímero se produce como consecuencia del contacto del material con un medio acuoso. Esto conduce a la depolimerización total por acción del agua en presencia de ácidos (hidrólisis ácida) o álcalis (hidrólisis básica), incluso puede verse como el proceso contrario a una policondensación [79].

La penetración del agua dentro de la matriz provoca la hidratación de las moléculas, ruptura de puentes de hidrógeno intermoleculares, el hinchamiento y finalmente la hidrólisis de los enlaces inestables. La ruptura de los grupos funcionales por hidrólisis, puede suceder tanto en los grupos situados en la cadena principal como en las ramificaciones [79].

Por lo tanto, para que este tipo de degradación polimérica tenga lugar, es necesario que en la cadena principal del polímero o en sus ramificaciones existan grupos hidrolizables; tal es el caso de poliésteres, poliamidas y acetatos de polivinilo. En este último, los grupos



hidrolizables están en las cadenas laterales o ramificaciones. Hay que señalar, que este tipo de proceso no es significativo a temperatura ambiente y pH neutro [74].

Durante el proceso de hidrólisis ocurre una disminución del peso molecular de las cadenas en función del tiempo de degradación, producto de las escisiones de cadena al azar características de este proceso, esto ocurre como consecuencia del ataque del agua o los iones ácidos o básicos a los enlaces éster de las cadenas [79].

**Fotodegradación.** Las reacciones promovidas por la acción de la luz pueden ser fotolíticas o fotoquímicas. Las primeras están provocadas por la acción exclusiva de la luz, mientras que las segundas se deben a la acción combinada de ésta con algún otro agente, como por ejemplo el O<sub>2</sub> (fotooxidación) o la humedad [74].

Las energías cuánticas asociadas con la luz solar en las partes del espectro violeta y ultravioleta cercana son de la magnitud suficiente para romper los enlaces químicos presentes en la mayoría de los polímeros. El mecanismo de fotodegradación, sin embargo, es más complejo de lo que se visualizaría por la simple ruptura del enlace, porque las fotoabsorciones se complican por diversos factores, incluida la cristalinidad que causa la dispersión de la luz. La presencia de impurezas pueden actuar como fotosensitivas acelerando notablemente el proceso de degradación [28].

Los polímeros en uso comercial actual a gran escala caen aproximadamente en tres categorías, dependiendo de su capacidad para resistir la fotodegradación [28] :

1. Polímeros que son resistentes a los ataques de la luz solar al aire libre, como el polietileno y el polimetacrilato de metilo.
2. Polímeros moderadamente estables, como politereftalato de etileno y policarbonato.
3. Polímeros que son inestables a la luz solar y requieren estabilizador de luz ultravioleta, como policloruro de vinilo, polipropileno, nailon, caucho y celulosa.

# CAPÍTULO II. Metodología y composiciones de los materiales.

---

En este capítulo se describen las especificaciones de los materiales empleados en la preparación de los morteros poliméricos sin y con partículas de desecho de PET y de los morteros de cemento Portland. Además de los métodos empleados para estudiar el efecto de la temperatura en los morteros poliméricos de resina de poliéster insaturada sin y con de desecho de PET sobre sus propiedades físicas (% en volumen de poros permeables y densidad) y mecánicas (resistencia a la compresión y resistencia a la flexión). Por otra parte, se describen las técnicas usadas en la caracterización de los materiales empleados (difracción de rayos X) y de morteros poliméricos (FTIR, microscopia estereoscópica y microscopía electrónica de barrido).

## **2.1. Materiales para la elaboración de morteros.**

Para la elaboración de los morteros poliméricos se utilizaron los siguientes materiales; como aglutinante se empleó resina de poliéster insaturada y como agregado fino se utilizó arena sílica. También se usaron partículas de desechos de politereftalato de etileno (PET) para sustituir el agregado fino. Adicionalmente se elaboraron morteros base cemento, dentro de los materiales convencionales para la preparación se encuentra el cemento tipo Portland como aglomerante, arena sílice como agregado natural y agua. A continuación, se describen los materiales utilizados en este trabajo.

### **2.1.1. Resina de poliéster insaturada.**

El aglutinante empleado para la elaboración de los MP fue una resina termoestable comercial de poliéster insaturada. Esta resina es conocida como de usos generales, por su gran versatilidad en varias aplicaciones. Dentro de sus características presenta buena aceptación de cargas minerales, excelente mojabilidad, gran versatilidad para formular el producto de acuerdo a las necesidades del cliente y buen acabado superficial. Para la preparación de la resina, primero se diluyó con monómero de estireno en una relación en peso 4:1, respectivamente. El sistema de curado de la resina se llevó a cabo usando peróxido de metil-etil-cetona, MEKP, como iniciador (1% en peso de la resina) y Naftenato de Cobalto, CoNp, (0.5 % en peso de la resina) como promotor.

### **2.1.2. Cemento: tipo Portland CPC-30R.**

Para la elaboración de los morteros de cemento Portland se utilizó un cemento comercial Portland compuesto con 30 MPa de resistencia nominal, apto para la construcción de elementos estructurales donde no se necesita algún requisito con característica especial, desarrollando un buen desempeño de fraguado, resistencia y rendimiento. Este cemento hidráulico cumple con las especificaciones de la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE, es clasificado como un cemento tipo II, de acuerdo a su resistencia [80].

### **2.1.3. Agregado fino: arena sílica estandarizada.**

La arena de sílice o arena sílica ( $\text{SiO}_2$ ) usada en este estudio cumple con la granulometría establecida por la Norma ASTM C 778 como se muestra en la Tabla 2.1 [81]. En la Fig. 2.1 se muestra la distribución de partícula de la arena empleada en la elaboración de morteros poliméricos y de cemento Portland.

Tabla 2.1. Granulometría de la arena para uso en morteros según la norma ASTM C 778.

Tamiz		Porcentaje que pasa	
#	Abertura (μm)	Límite inferior	Límite superior
16	1180	100	100
30	600	96	100
40	425	65	75
50	300	20	30
100	150	0	4

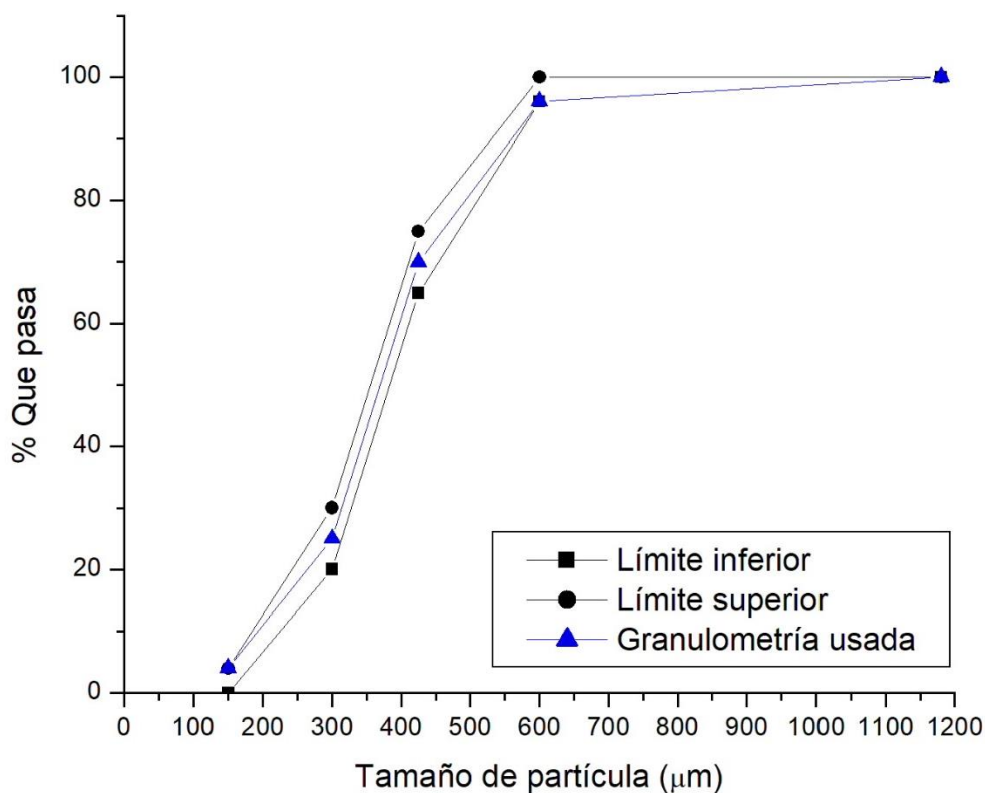


Figura 2.1. Distribución de partícula de la arena

#### 2.1.4. Sustituto de agregado fino: partículas de desecho de PET.

Las partículas de desecho de PET, se obtuvieron de envases de PET de agua embotellada, con diferente coloración y espesores aproximados a 1 mm. Las botellas se cortaron manualmente en partículas de 5x5 mm, como se puede apreciar en la Fig. 2.2. A continuación, para garantizar uniformidad en las dimensiones de las partículas fueron

tamizadas usando mallas Tyler, No. 3½ y No. 4, las partículas se utilizaron directamente como sustituyente de agregado mineral.



Figura 2.2. Partículas de desecho de PET.

#### **2.1.5. Agua: agua potable proveniente de la red municipal.**

Para la elaboración de los morteros de cemento Portland se empleó agua proveniente de la red local. Esta agua de mezclado debe ser clara y aparentemente limpia, no se deben de observar partículas flotantes ni contener sustancias saborizantes ni decolorantes, estas especificaciones se marcan en la norma ASTM C-94/C 94M-03A [82].

### **2.2. Preparación de los morteros.**

A continuación, se describe como se llevó a cabo la preparación de los morteros poliméricos sin y con partículas de desecho de PET y los morteros de cemento Portland. Se obtuvieron probetas cúbicas con tamaño de 50x50x50 mm para ensayos de resistencia a la compresión y determinación de % en volumen de poros permeables y densidad ( $\rho$ ), y probetas prismáticas de 40X40X160 mm para ensayos de resistencia a la flexión. Todos los ensayos se realizaron por triplicado, el valor que se reporta es el promedio de los valores obtenidos.

#### **2.2.1. Morteros poliméricos sin y con partículas de PET.**

Para determinar el porcentaje óptimo de desechos de PET a sustituir por arena sílica, en los morteros con PET, se elaboraron morteros con 3 porcentajes de sustitución de agregado fino (arena sílica) por partículas de desecho de PET, en 1%, 2% y 3% en peso, adicionalmente se

elaboraron morteros poliméricos sin partículas de PET, como mortero de control para comparar el efecto de las sustituciones de PET como agregado mineral. En la Tabla 2.2 se enlista la nomenclatura empleada para las diferentes formulaciones y las proporciones usadas en la elaboración de los morteros poliméricos. Según a lo que se ha reportado en los primeros estudios sobre concreto con resina de poliéster, se informa que la resistencia a la compresión del concreto polimérico depende del contenido de resina. Tanto la resistencia a la compresión como la resistencia a la flexión se incrementan con el aumento en el contenido del polímero. Normalmente, el contenido del aglutinante oscila entre 5% y 15% del peso total, pero si en la mezcla se utiliza un agregado fino, puede requerir hasta un 20% de aglutinante [6, 8, 46], se recomienda una mayor dosis de resina cuando se usa un agregado fino, debido a la gran superficie de estos materiales [6]. Es por esto que se empleó una relación en peso de resina de poliéster/arena de 20/80, respectivamente.

Tabla 2.2. Formulaciones empleadas en la elaboración de morteros poliméricos.

Formulación	% peso		
	RPI*	Arena sílica	Partículas de PET
MP0	20	80	0
MP1	20	79	1
MP2	20	78	2
MP3	20	77	3

\*RPI, resina de poliéster insaturada

La preparación de estos morteros se realizó primero diluyendo la resina de poliéster insaturada con el monómero de estireno y al obtener una mezcla uniforme, se inició el proceso de curado agregando a la mezcla 0.5% en peso del CoNp, después se añadió 1% en peso de MEKP.

Por separado, la arena sílica y las partículas de desecho de PET se mezclaron uniformemente, después estos agregados se añadieron a la resina y se mezclaron manualmente hasta asegurar una apropiada incorporación de los componentes. Enseguida, la mezcla se vació a los moldes cúbicos y prismáticos empleados. Las probetas fueron curadas a temperatura ambiente y condiciones de laboratorio durante 5 días, el primer día en el molde, después se desmoldaron y dejaron curar los 4 días restantes a 25 °C aproximadamente. El aspecto de los morteros poliméricos curados se puede observar en la Fig. 2.3, los morteros poliméricos

se caracterizan por un buen acabado superficial, una superficie plana y lisa, la cual se observa libre de defectos, por estas razones una aplicación de estos materiales es en recubrimiento de pisos o patios, sin la necesidad un trabajo de acabado.

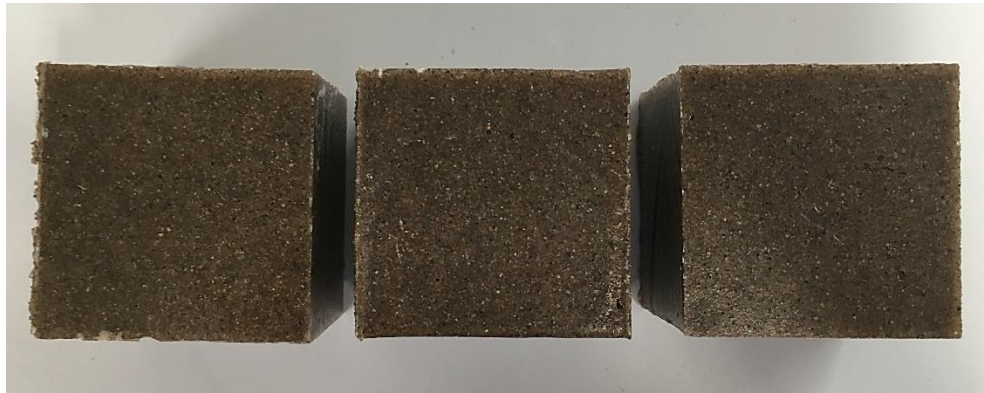


Figura 2.3. Aspecto de los morteros poliméricos después del proceso de curado.

### 2.2.2. Morteros de cemento Portland (MCP).

Con el fin de comparar el rendimiento de los morteros poliméricos con un mortero base cemento, se elaboraron morteros de cemento Portland. La relación peso cemento/agregado fino/agua fue 1/2.75/0.485, de acuerdo la norma ASTM C109 [83]. Los MCP se dejaron curar en un recipiente cerrado herméticamente, cubriéndolos en su totalidad con agua por 28 días, en la Fig. 2.4, se pueden observar los morteros después de haber sido endurecidos. Estos morteros de base cemento, presentan una superficie rugosa además de una serie de protuberancias en sus caras.



Figura 2.4. Aspecto de los morteros base cemento después de 28 días de curado.

### 2.3. Caracterización de la resina de poliéster insaturada y partículas de PET.

Para conocer las fases cristalinas presentes en los materiales empleados, se realizó análisis de difracción de rayos X de las partículas de desecho de PET (transparentes y de coloración verde), Fig. 2.2 y una pieza de la resina de poliéster insaturada que se curó sin ningún relleno o agregado, Fig. 2.5. Se utilizó un Difractómetro de Rayos X marca Bruker Modelo D8 Advance, como generador de rayos X utiliza un tubo de Cobre y detector de ojo de lince, el barrido se realizó en un ángulo  $2\theta$  de 0 a  $60^\circ$ . El número de archivo PDF (por sus siglas en inglés *Powder Diffraction File*) utilizado para identificar las fases presentes en los materiales poliméricos fue: 050-275 Tereftalato de polietileno ( $C_{10}H_8O_4$ )<sub>n</sub> y para la resina de poliéster insaturada curada 060-0990 Resina poliéster ( $C_{12}H_{12}O_4$ ).

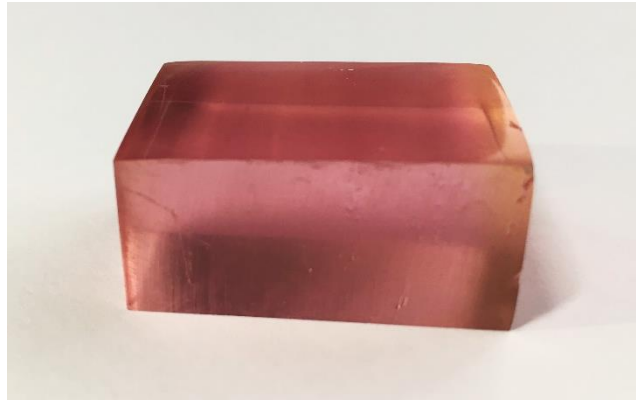


Figura 2.5. Mortero de resina de poliéster curada.

### 2.4. Tratamiento térmico a los morteros poliméricos.

Los materiales poliméricos son más susceptibles a la exposición térmica que los materiales base cemento. Para poder evaluar el efecto de la temperatura en las propiedades mecánicas se les aplicó un tratamiento térmico a los morteros poliméricos de resina de poliéster insaturada sin y con partículas de desecho de PET. Al finalizar los cinco días de curado a condiciones de laboratorio, los morteros poliméricos se sometieron a un calentamiento a las temperaturas de  $40^\circ\text{C}$ ,  $100^\circ\text{C}$ ,  $200^\circ\text{C}$  y  $300^\circ\text{C}$  por un periodo de 3 horas, posteriormente se dejaron los morteros enfriando una hora dentro del horno para facilitar su manipulación, después de éste tiempo, se colocaron en un desecador donde continuó el enfriamiento por 24 horas más. El tratamiento térmico en las temperaturas de  $40^\circ\text{C}$ ,  $100^\circ\text{C}$  y  $200^\circ\text{C}$  se llevó a cabo en una estufa marca Felisa modelo AR-290D, la cual cuenta con un rango de temperatura: ambiente hasta  $220^\circ\text{C}$ , sensibilidad:  $\pm 2^\circ\text{C}$ . Los morteros expuestos a  $300^\circ\text{C}$



se sometieron en una mufla marca Felisa modelo FE-34, temperatura máxima de operación 1100 °C y sensibilidad:  $\pm 2$  °C a 1000 °C como se ilustra en la Fig. 2.6.



Figura 2.6. Morteros poliméricos antes de un calentamiento de 3 horas en la mufla.

## 2.5. Técnicas para la evaluación del efecto de la temperatura sobre morteros poliméricos sin y con partículas de desecho de PET.

Con el fin de describir el efecto de la incorporación de las partículas de PET como sustituto de agregado fino, antes y después de un tratamiento térmico, se llevaron a cabo ensayos para determinar la evolución de las propiedades físicas (porosidad y densidad) así como mecánicas (resistencia a la flexión y resistencia a la compresión) en los morteros poliméricos sin y con partículas de desechos de PET. Las propiedades presentadas en este documento representan el promedio de tres especímenes, a menos que se indique lo contrario.

### 2.5.1. Determinación de la porosidad y densidad en los morteros poliméricos tratados térmicamente.

Para medir la porosidad y densidad de los morteros poliméricos sin y con partículas de PET después de un calentamiento controlado, se siguió la metodología de la norma ASTM C 642 [84]. Los morteros tratados térmicamente, se ensayaron después de un enfriamiento en un desecador por 24 horas; de igual manera se ensayó un mortero polimérico de cada formulación sin ningún tratamiento térmico, con el propósito de contar con un mortero de control; estos morteros (MP0, MP1, MP2 y MP3) se analizaron después de los 5 días de curado. Con respecto a los morteros de cemento Portland, se ensayaron a los 28 días de

curado. Todas las mediciones se registraron en gramos mediante una balanza analítica marca Adventurer con una precisión de 0.01 g.

Los morteros se examinaron en muestras con dimensiones de 50x50x50 mm (ver Fig. 2.3 y Fig. 2.4), la prueba se realizó por triplicado, cada uno de los morteros se sometió al ensayo por separado, verificando visualmente que cada muestra estuviera libre de grietas observables, fisuras o bordes rotos.

El procedimiento para determinar la porosidad en cada uno de los morteros poliméricos se describe a continuación:

1. Masa seca en el horno. Para determinar la masa de las muestras, se secaron en una estufa marca Felisa a una temperatura de  $100\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  por 24 horas. Después de retirar cada muestra de la estufa, se dejaron enfriar en un desecador a condiciones de laboratorio, posteriormente se determinó la masa. Este valor se designó como A.
2. Masa saturada después de la inmersión. Después de la determinación del valor A, la muestra se sumergió por 48 horas en agua. Al término de este lapso, se secó la superficie de cada muestra mediante la eliminación del exceso de agua de la superficie con una toalla, y se determinó la masa. Se designó este valor como la masa superficial seca después de la inmersión B.
3. Masa saturada después de la ebullición. Enseguida se colocaron las muestras en un recipiente metálico, cubriendo completamente las muestras con agua, posteriormente se dejaron hervir durante 5 horas. Después de este tiempo, se retiró el recipiente del calentamiento y se dejó enfriar mediante una pérdida natural de calor durante aproximadamente 14 horas. Se retiró el exceso de agua de la superficie con una toalla y se determinó la masa de la muestra. Se designó como C.
4. Masa aparente inmersa. A continuación, las muestras son suspendidas con la ayuda de un alambre en un recipiente con agua, para determinar el peso del agua desplazada, designado como D.

Con los valores obtenidos de acuerdo al método descrito anteriormente, se determina el % en volumen de espacio permeable de los poros (vacíos) y la densidad de las muestras ensayadas, con las siguientes ecuaciones:

$$\text{Densidad aparente, seca} = \left( \frac{A}{C-D} \right) \times \rho = g_1 \quad (1)$$

$$\text{Densidad aparente} = \left( \frac{A}{A-D} \right) \times \rho = g_2 \quad (2)$$

$$\text{Volumen de espacio permeable de los poros (vacíos), \%} = \left( \frac{g_2 - g_1}{g_2} \right) \times 100 \quad (3)$$

dónde:

$\rho$  es la densidad del agua a 1 atm y 25 °C, en g/cm<sup>3</sup> y  $g_1$ ,  $g_2$  se obtienen en g/cm<sup>3</sup>.

La densidad reportada en los resultados de este trabajo es la “densidad aparente, seca” o  $g_1$ , la cual solo se referirá como densidad.

### 2.5.2. Ensayo de resistencia a la compresión.

La resistencia a la compresión se determinó en los morteros poliméricos sin y con partículas de PET, además de los morteros de cemento Portland, según la norma ASTM C 109 [83]. En los morteros poliméricos a los cuales se les aplicó un calentamiento, se realizó el ensayo un día después haber realizado este tratamiento. En los morteros de cemento Portland se realizó el ensayo a los 28 días de curado.

Para la realización del ensayo se utilizó una maquina universal marca Shimadzu Modelo UH-600 kNI. La carga se aplicó a una velocidad de 1 mm/min, se debe de aplicar la carga a las caras del espécimen que estuvieron en contacto con las superficies planas del molde, ver Fig. 2.7. Una vez obtenida la carga máxima de rotura, se calcula la resistencia a la compresión para cada una de las probetas ensayadas, con la siguiente ecuación:

$$\text{Resistencia a la compresión, MPa} = \frac{F}{A} \quad (4)$$

dónde:

F es la carga total máxima en N y A es el área de la superficie donde se aplica la carga en mm<sup>2</sup>

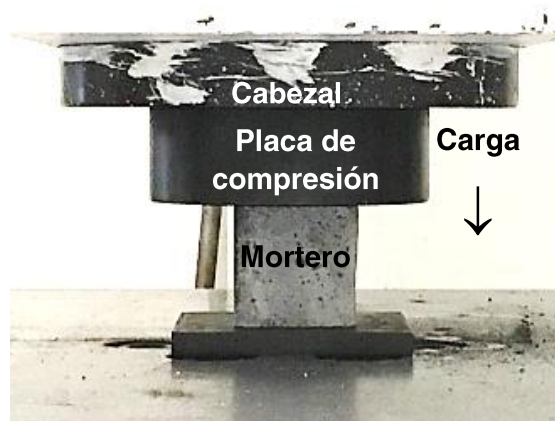


Figura 2.7. Ejemplo de ensayo de resistencia a la compresión en un mortero base cemento Portland.

### 2.5.3. Ensayo de resistencia a la flexión.

Se realizaron pruebas de resistencia a la flexión de tres puntos, de acuerdo a la norma ASTM C 348 en los morteros poliméricos y morteros de cemento Portland [85]. La resistencia a la flexión fue evaluada a los 5 días de curado en los morteros poliméricos, se realizó el ensayo en los morteros a temperatura ambiente y un día después de los tratamientos térmicos (40 °C, 100 °C y 200 °C por 3 horas).

Para esta prueba se empleó una maquina universal marca SHIMADZU modelo AG-1, con una capacidad máxima de 100 kN (ver Fig. 2.8b). La carga se aplicó a una velocidad de desplazamiento de 3 mm/min. Una vez obtenido el valor máximo de la carga para cada probeta, se calculó la resistencia a la flexión de acuerdo a la ecuación:

$$\text{Resistencia a la flexión, MPa} = 0.0028 \times P \quad (5)$$

dónde:

P es la carga total máxima en N.

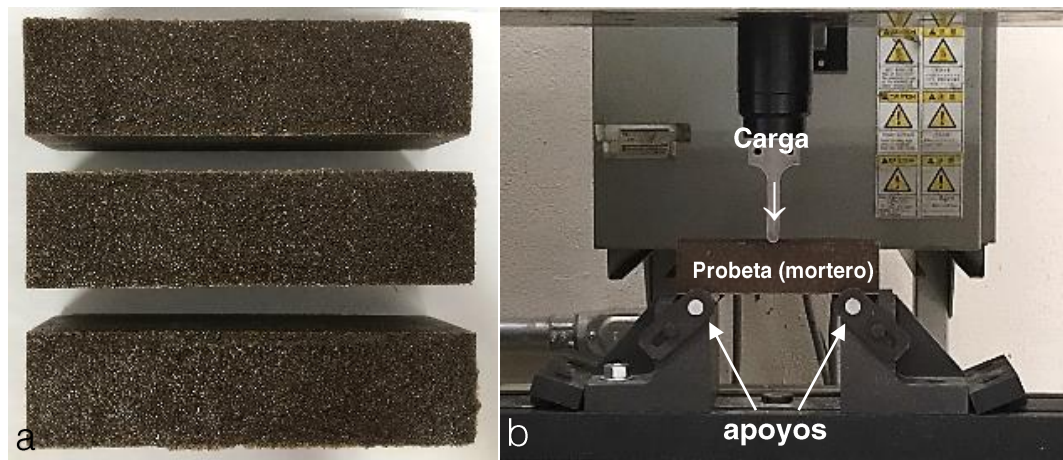


Figura 2.8. Probetas de morteros poliméricos para ensayo a la resistencia a la flexión (a) y ejemplo de la realización de un ensayo de resistencia a la flexión (b).

### 2.6. Análisis de la morfología de los morteros poliméricos sin y con partículas de PET mediante microscopia.

Para observar la morfología de los morteros poliméricos obtenidos, la matriz formada y la interfaz entre la matriz y la partícula de desecho de PET en los morteros poliméricos, antes y

después de cada temperatura de exposición se utilizaron dos técnicas, microscopia estereoscópica y microscopia electrónica de barrido.

### 2.6.1. Microscopia estereoscópica.

Para observar la morfología de los morteros poliméricos y la interfaz matriz-partícula en los morteros antes y después de cada una de las temperaturas de exposición se utilizó un microscopio estereoscópico Olympus SZX16 con luz polarizada reflejada, las imágenes se tomaron a 7X. La principal característica de este microscopio es que permite obtener una imagen tridimensional (3D) de la muestra observada permitiendo una mayor profundidad de campo y una mayor nitidez de las imágenes al tratarse de muestras porosas.

### 2.6.2. Microscopia electrónica de barrido (MEB).

Se obtuvieron imágenes por microscopia electrónica de barrido de los morteros poliméricos con partículas de PET, con el fin de observar la interfaz entre las partículas de PET y la resina de poliéster insaturada con la arena, y los cambios ocurridos en la matriz después del tratamiento térmico que se aplicó a los morteros. El equipo empleado fue un microscopio electrónico de barrido marca Phillips modelo XL -30, se trabajó con un voltaje de 20.0 kV. En la preparación de la muestra, primero se realizó un recubrimiento con oro (ver Fig. 2.9), con el fin de comportarse como una muestra conductora y así poder observarla con el microscopio.

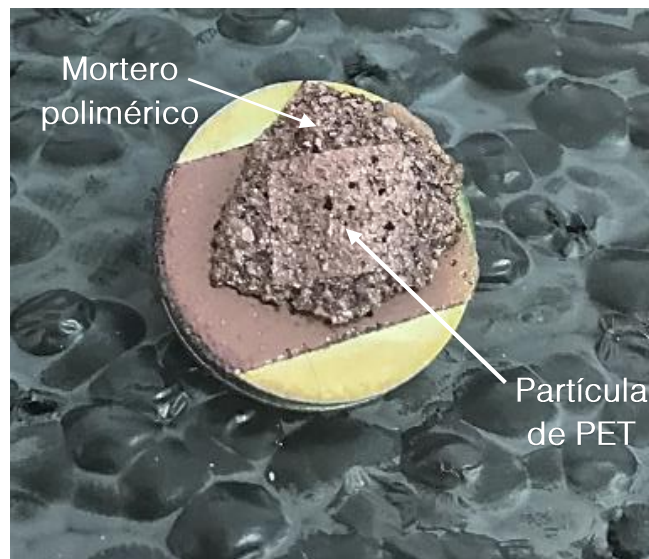


Figura 2.9. Fragmento montado de un mortero polimérico con adición de PET recubierto con oro para MEB.

## 2.7. Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR).

El análisis FTIR se basa en la absorción de la radiación infrarroja en longitudes de onda determinadas, tiene lugar en la región del infrarrojo medio con una longitud de onda entre los 4000 a 400  $\text{cm}^{-1}$ . La radiación infrarroja interactúa con la materia y se produce un cambio en su estado energético lo que ocasiona una vibración de los enlaces a ciertas frecuencias. Los grupos funcionales absorben la radiación infrarroja siempre en la misma longitud de onda sin importar la estructura del resto de la molécula a la que pertenezcan, lo cual indica la correlación entre la longitud de onda a la cual la molécula absorbe la radiación infrarroja y su estructura [86].

El propósito de este análisis fue verificar si se presentaron modificaciones en la estructura química de la resina de poliéster insaturada antes y después del tratamiento térmico de los MP. Se realizó un análisis de Espectroscopia Infrarroja mediante un Espectrómetro FT-IR Nicolet iS10 de Thermo Scientific en las muestras después de cada tratamiento térmico.

# CAPÍTULO III. Comportamiento de los morteros poliméricos frente a la temperatura.

---

La incorporación de desechos plásticos en los morteros poliméricos no es una actividad reciente en la industria de la construcción, sin embargo, no existe la suficiente información sobre el comportamiento de morteros poliméricos de resina de poliéster con incorporaciones de partículas de desecho de PET, los cuales hayan sido sometidos a un tratamiento térmico. La evaluación de las propiedades mecánicas y los cambios en la porosidad ocasionados por el efecto de la temperatura es de vital importancia para determinar cuáles son los limitantes de uso de estos materiales. En este capítulo se presentan los resultados obtenidos y la discusión del efecto de la temperatura en los morteros poliméricos.

### 3.1. Caracterización de la resina y de las partículas de PET por difracción de rayos X.

Los patrones de difracción de rayos X de las partículas de PET (transparente y de coloración verde) y la resina de poliéster insaturada se muestran en la Fig. 3.1. Se puede observar que los patrones de difracción para ambas partículas de PET (transparente y de coloración verde) son muy similares, el PET es un polímero que tiene regiones tanto amorfas como cristalinas [87], es decir, cuenta con una estructura semicristalina, ver Fig. 3.2b. El PET posee una estructura semicristalina debido a que es un polímero lineal y las cadenas cuentan con una mayor capacidad de alinearse unas sobre otras, generando un ordenamiento parcial en regiones, lo que favorece la cristalinidad del polímero. Tanto la partícula de PET transparente y la partícula de coloración verde, comparten el mismo patrón de difracción, se muestra un pico de gran amplitud a un ángulo  $2\theta$  de  $26^\circ$  aproximadamente, el cual corresponde al pico característico del PET reportado en literatura [8].

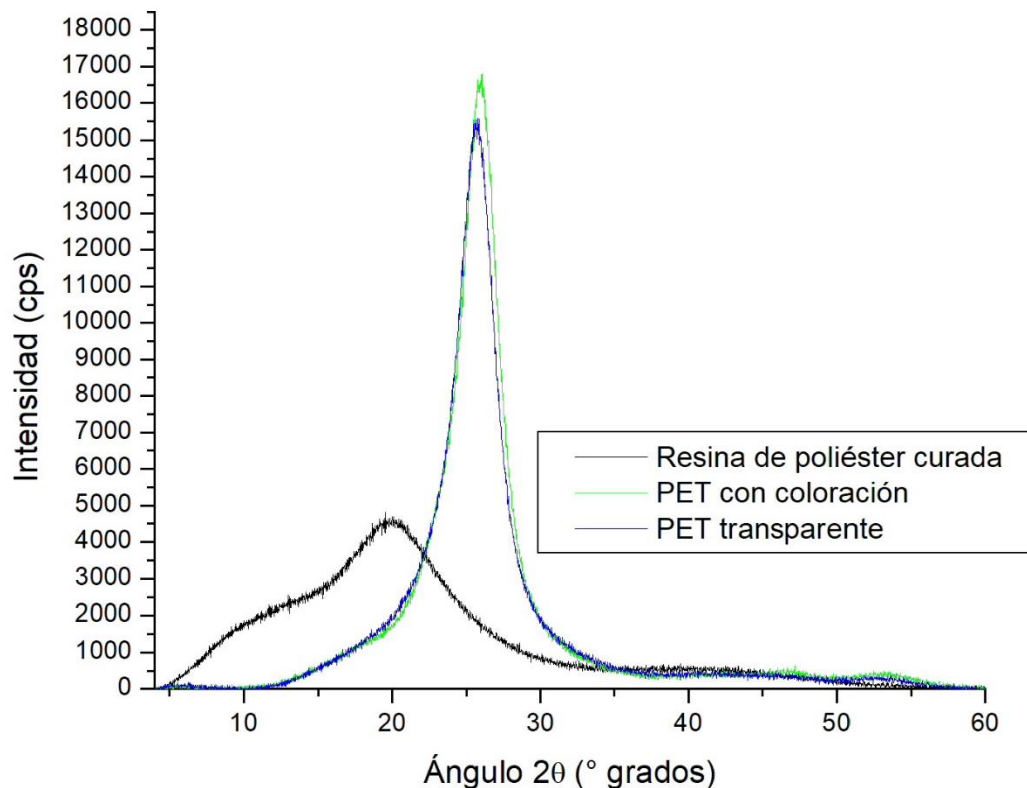


Figura 3.1. Patrones de difracción de las partículas de PET y de la resina de poliéster curada.



La resina de poliéster curada muestra un patrón de difracción correspondiente a una fase amorfa, el término amorfo se usa como una descripción de la estructura de un material e implica que no existe un orden de largo alcance como el que se encuentra en las sustancias cristalinas, ver Fig. 3.2a [88]; esta ausencia de orden en los sólidos amorfos, da como resultado una curva de difracción de rayos X que muestra uno o dos máximos con una anchura que puede llegar a los  $10^\circ$  [89]. La fase amorfa de la resina de poliéster curada puede atribuirse a que, durante el proceso de curado la estructura pierde su cristalinidad, ya que se presenta la reticulación de las cadenas; cada cadena de poliéster está unida en diversos sitios a lo largo de otras cadenas de poliéster, mediante el estireno, de alguna manera “tejida” en tres dimensiones, por esto, en la resina curada debido a los enlaces cruzados, sus cadenas no pueden doblarse o acomodarse [8, 26].

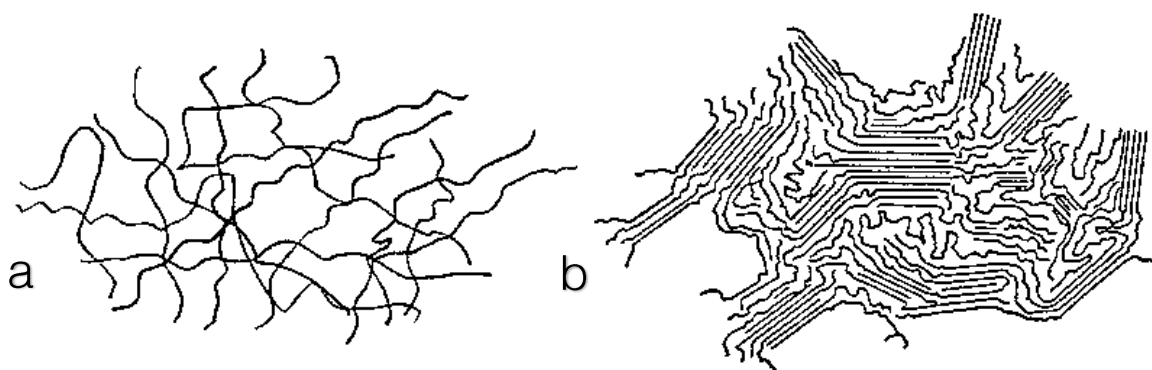


Figura 3.2. Estructura molecular de un polímero: a. Amorfo y b. Semicristalino.

### 3.2. Determinación del porcentaje óptimo de partículas de desecho de PET a sustituir en los morteros poliméricos.

En este apartado se discutirán los criterios que fueron tomados en cuenta para decidir el porcentaje de partículas de desecho de PET a sustituir por agregado mineral en la elaboración de morteros poliméricos. Varios investigadores han sustituido parcialmente agregado mineral por partículas de desecho de PET, en porcentajes menores a 5%, debido a la disminución de las propiedades mecánicas al aumentar el desecho de plástico en el mortero, ver Tabla 1.3; en esta investigación se empleó 1%, 2% y 3% de partículas de PET como sustituto de agregado natural. Además, se usó un mortero de control, el cual es un mortero al que no se modificó su formulación, es decir solo está constituido de resina termoestable/arena. Los resultados de cada ensayo realizado se mostrarán en tablas, cada ensayo se realizó por triplicado, en este trabajo solo se presenta el promedio de los resultados obtenidos; se añadirá el valor de la desviación estándar ( $\sigma$ ) de cada ensayo, ésta es una

medida de dispersión que, en un conjunto de datos, indica cuánto pueden alejarse los valores respecto a la media o promedio.

### 3.2.1. Determinación de la resistencia a la compresión de los morteros poliméricos con partículas de desecho de PET.

Las propiedades mecánicas de los materiales se refieren a la capacidad de cada material en estado sólido a resistir acciones de cargas o fuerzas, respondiendo con un esfuerzo mecánico para alcanzar el equilibrio. El esfuerzo mecánico principal que evalúa el comportamiento mecánico de los materiales de construcción es la compresión. La resistencia a la compresión del concreto o mortero es la medida más común de desempeño que se emplea para diseñar edificios y otras estructuras [90].

En la Tabla 3.1, se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de resistencia a la compresión realizados a los morteros poliméricos con sustitución de agregado fino en 1% (MP1), 2% (MP2) y 3% (MP3) con partículas de desecho de PET. Se puede apreciar el efecto de la sustitución de las partículas de PET en la resistencia a la compresión de los morteros poliméricos.

Tabla 3.1. Resultados de ensayos de resistencia a la compresión de los morteros poliméricos

Formulación	MPa	$\sigma$
MP0	66.15	1.19
MP1	72.63	2.34
MP2	70.51	2.03
MP3	61.38	0.96

Al emplear partículas de PET como sustituyente de arena, se muestra un considerable aumento en la resistencia a la compresión. Debido a la naturaleza química similar, de la resina de poliéster insaturada y de las partículas de PET que contienen grupos poliésteres en sus cadenas poliméricas, se favoreció una buena unión entre éstas [8], lo cual incidió en las propiedades mecánicas que fueron mejoradas. El valor de la resistencia a la compresión aumentó cerca de un 10% en el caso del MP1 y cerca de 7% en el MP2, pero en la formulación MP3 su resistencia decae aproximadamente un 7%, cuando se sustituyó un 3% de desechos de PET, estos valores en comparación con el MP0. Posiblemente esto es causado por una falta de unión entre los agregados minerales y el PET con la matriz polimérica, al no existir

una interfaz entre éstos materiales, la transferencia de carga de la matriz al refuerzo (o partículas) no será eficiente, provocando que falle el material, o produciendo huecos entre la matriz y el refuerzo, hasta ocasionar que la unión entre la matriz y el refuerzo se debilite [46].

El valor de  $\sigma$  es pequeño, esto significa que los valores de un conjunto de datos estadísticos se encuentran cerca de la media del conjunto de estos, en promedio, es decir los valores obtenidos fueron uniformes entre sí.

### 3.2.2. Determinación de porosidad y densidad de los morteros poliméricos con partículas de desecho de PET.

La porosidad es una propiedad del mortero y esta expresada en porcentaje que relaciona el volumen que ocupan los poros en un volumen referente al volumen total del mismo, por lo tanto, la determinación del porcentaje en volumen de poros permeables en el material, representa la porosidad de las muestras. La densidad ( $\rho$ ) de un material compuesto, en este caso un mortero polimérico, dependerá de las densidades de los materiales que lo componen, así como de la cantidad de poros presente en el mismo. En la Tabla 3.2 se muestran los resultados obtenidos al sustituir agregado mineral por partículas de desecho de PET mediante la norma ASTM C 642 [84].

Tabla 3.2. Valores de porcentaje en volumen de poros permeables y densidad de los morteros poliméricos.

Formulación	%	$\sigma$	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\sigma$
MP0	1.41	0.42	2.08	0.01
MP1	2.19	0.12	2.05	0.02
MP2	4.46	0.22	2.04	0.01
MP3	7.42	0.25	2.03	0.02

Al comparar los resultados de los MP1, MP2 y MP3 con el mortero de control, MP0; se puede inferir que conforme se incrementa la cantidad de partículas de PET en el material compuesto, se aumenta la cantidad de poros permeables. El MP1 tuvo un aumento de un 55%, cuando se sustituye 1% de partículas de PET, mientras que en el MP2 se triplicó la porosidad y el peor comportamiento lo presentó el MP3, puesto que su porosidad se elevó más de 500%, todos estos valores se toman con respecto al mortero de control.

Con respecto a la densidad de los morteros poliméricos sin y con partículas de PET, esta varía de 2.03 a 2.08 g/cm<sup>3</sup>, conforme se aumenta la cantidad de desechos de partículas de PET,

el valor de la densidad disminuye en 1.44% en el MP1, 1.92% en el MP2, y 2.04% en el MP3, con relación al mortero de control. Al tener menos cantidad de poros el mortero es más denso, por lo tanto, la cantidad de agua que puede pasar a través de ellos será menor.

Estos resultados concuerdan con estudios previos, que de igual manera emplearon partículas de PET como sustituto de arena en la elaboración de morteros [54, 67], en los cuales se concluye que, al sustituir agregado mineral por un desecho plástico, aumenta la absorción de agua conforme se incrementa la tasa de sustitución, generando que el mortero se vuelva poroso. Esto puede ser ocasionado por la forma plana y alargada que presentan las partículas de PET, esto impide que los componentes del mortero puedan empaquetarse eficazmente, debido a que el PET retiene burbujas de aire en la interfaz durante el proceso de mezclado [8]. Por lo tanto, los morteros poliméricos al contener una mayor proporción de partículas de PET, se incrementa la cantidad de burbujas, aumentando la porosidad. Albano et al. atribuyen este aumento a que al sustituir parte del agregado natural por PET (con una granulometría diferente), este último crea una porosidad propia y diferente a la creada por la arena [14], modificando la morfología del mortero polimérico. En la Fig. 3.3 se puede observar la interfaz de las partículas de PET, las cuales retuvieron burbujas de aire, indicados por óvalos con contorno negro.

La inclusión de PET implica defectos en la estructura interna del mortero, produciendo una reducción de la resistencia y una disminución de la rigidez. Este comportamiento puede ser rentable cuando no se requiere una resistencia muy alta del material, específicamente a contenidos de PET del 2% y 3%. El tamaño y contenido de partículas de PET dificulta la compactación de los componentes, lo que aumenta las cavidades o poros en el mortero polimérico, reduciendo así significativamente la resistencia a la compresión.

Con respecto a los criterios antes mencionados, el mortero que ofrece el mejor comportamiento mecánico, es el MP1. Su resistencia a la compresión fue mayor que el mortero de control y que los morteros MP2 y MP3. El aumento en la resistencia demostró que las partículas de PET no sólo se comportan como sustitutos de agregado mineral, sino que además se desempeñan como refuerzo en el mortero polimérico. A pesar que la porosidad del MP1 aumentó con respecto al mortero de control, fue mínima en comparación con las demás formulaciones. Tomando en cuenta estos razonamientos se optó por excluir los morteros poliméricos MP2 y MP3. El MP2, presentó una mayor resistencia a la compresión que el mortero de control, no obstante, su porosidad aumentó más del 50%, representando

una desventaja en aplicaciones donde se requiere mínima permeabilidad, porque puede provocar que soluciones agresivas o agua permeen en el material y originen un deterioro en el mismo, afectando su durabilidad. En el MP3, en donde se empleó 3% de desechos de partículas de PET, exhibe un deficiente desempeño mecánico, su resistencia a la compresión fue menor que el mortero de control y el MP2, además que la porosidad que contiene fue mayor que todos los morteros poliméricos.

Aunque en los MP2 y MP3, el efecto de la sustitución del agregado fino por PET dio lugar a una disminución de las propiedades mecánicas, Albano et al. sugieren que estos tipos de morteros pueden usarse para encapsular materiales de desecho de otras industrias y para producir concretos ecológicamente seguros, así como sub-bases de carreteras, barreras de contención y en aplicaciones donde no es necesaria una alta resistencia. Además, debido al aumento en la porosidad, una posible aplicación podría ser en canchas deportivas y pavimentos que necesitan un buen drenaje de agua [14].

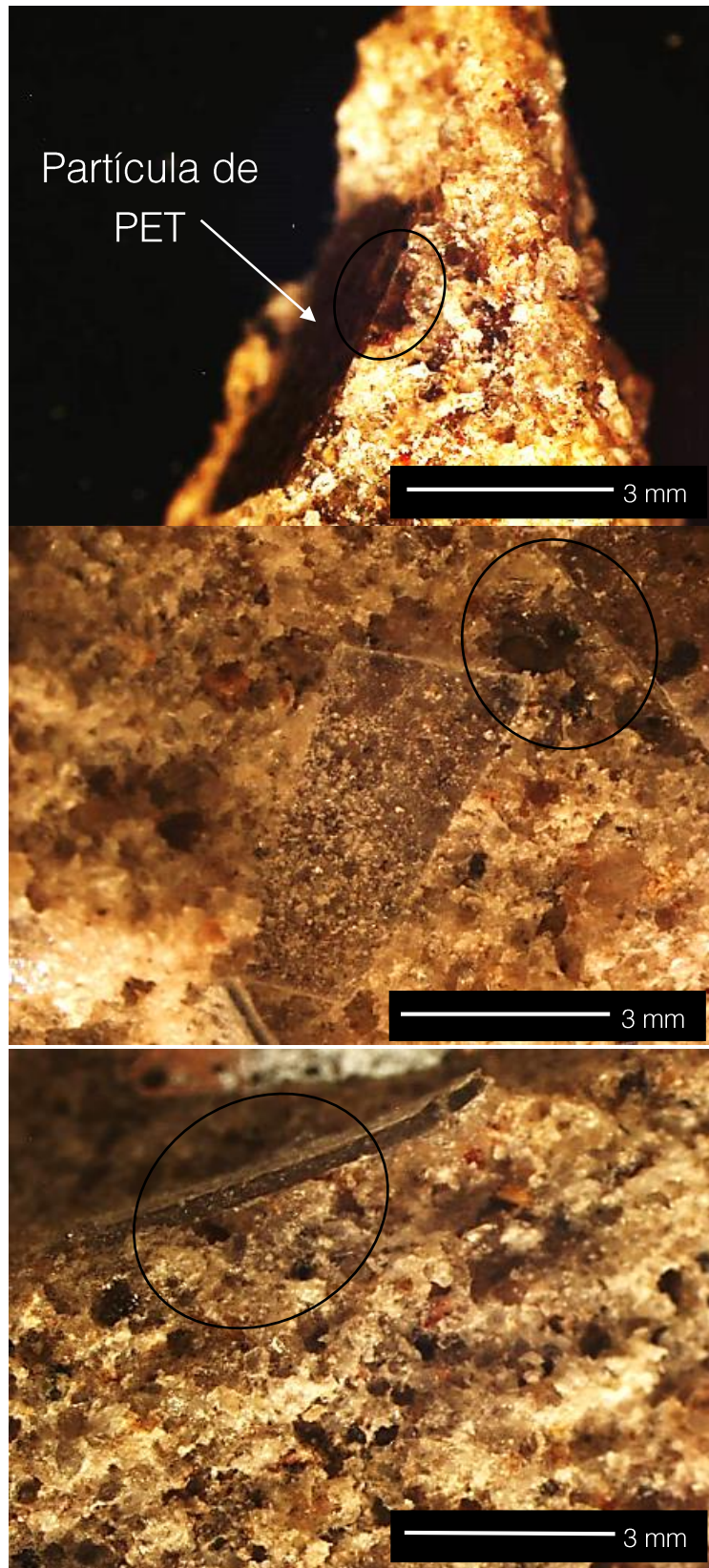


Figura 3.3. Micrografías de morteros poliméricos (MP1) con partículas de desecho de PET.

### **3.3. Comportamiento mecánico de los morteros poliméricos a altas temperaturas**

Los materiales compuestos son combinaciones macroscópicas de dos o más materiales diferentes que tienen una interfaz discreta y reconocible entre ellos. Consisten en una matriz continua rodeada por fases dispersas. Las principales funciones de la matriz son: (a) proporcionar las propiedades físicas y químicas; (b) transmitir cargas al refuerzo; y (c) proteger y proporcionar cohesión. Varios tipos de materiales compuestos incluyen refuerzo con partículas o fibras. Además, la interfaz matriz/refuerzo en los materiales compuestos influyen en los procesos de fabricación y determinan el rendimiento de los mismos. Algunos refuerzos pueden no ser compatibles con las matrices poliméricas en vista de sus propiedades físicas y/o químicas, causando un fallo prematuro de los materiales compuestos. La resistencia a la compresión y flexión de los materiales compuestos se ven afectadas por diferentes parámetros, incluidos el tamaño y el tipo de relleno, la temperatura de funcionamiento y la unión entre los agregados con la matriz [46]. Es por esto, que en esta sección, se tratará el efecto de la temperatura en las propiedades mecánicas de los morteros (MP0 y MP1), los cuales están constituidos por dos tipos diferentes de materiales poliméricos, una matriz termoestable (resina de poliéster) y un agregado termoplástico (partículas de PET), por lo tanto, su comportamiento frente a un tratamiento térmico será completamente distinto.

#### **3.3.1. Resistencia a la compresión de los morteros poliméricos tratados térmicamente.**

Se determinó la resistencia a la compresión de los morteros poliméricos, MP0 y MP1, después de ser tratados a 40 °C, 100 °C, 200 °C y 300 °C, en un tiempo de exposición de 3 horas; de igual manera, para cada formulación (MP0 y MP1) se empleó un mortero de control, el cual no fue tratado térmicamente, se mantuvo a condiciones de laboratorio hasta su ensayo, este se designa como MP0 o MP1 a 25°C.

En la Tabla 3.3 se reúnen los datos obtenidos de los ensayos de resistencia a la compresión de los morteros MP0 y MP1 a las diferentes temperaturas de tratamiento. Conforme se incrementa la temperatura de tratamiento, el comportamiento mecánico que exhiben los morteros poliméricos varía dependiendo de la temperatura.

Tabla 3.3. Resultados de la resistencia a la compresión de MP tratados térmicamente.

Temperatura (°C)	MP0		MP1	
	MPa	$\sigma$	MPa	$\sigma$
25	66.15	1.19	72.63	2.34
40	67.61	3.17	73.09	1.45
100	80.83	2.26	83.23	0.27
200	86.20	2.23	62.96	1.55
300	45.59	2.47	44.53	1.87

En primer lugar, se puede observar que, para ambas formulaciones, MP0 y MP1, se presenta un aumento en la resistencia mecánica al elevar la condición de calentamiento. En los morteros tratados a 40 °C, el incremento en su valor a la resistencia a la compresión no es tan notable para el MP0, siendo un 2% mayor al mortero de control y para el MP1 la mejoría fue menor al 1%. A 100 °C las resistencias se vuelven muy similares en ambas formulaciones con una diferencia del 3% entre sus valores de resistencia. Sin embargo, a 200 °C el MP0 desarrolla la máxima resistencia a la compresión, aumentando un 30% en comparación de su valor inicial (MP0 a 25 °C), a diferencia de los morteros que contienen partículas de desecho de PET, en los cuales sus propiedades mecánicas empiezan a decaer cuando fueron tratados a 200 °C. A 200 °C el MP1 pierde 13% de su resistencia respecto al mortero de control, y en los morteros que fueron tratados a 300° C, la resistencia a la compresión disminuye considerablemente un 38%, respecto al mortero de control y un 24% respecto al máximo de la resistencia alcanzada en los MP1. A partir de 300 °C la resistencia de los morteros poliméricos sin partículas de PET empezó a decaer, un 31 % en el MP0 con respecto al mortero de control. Al comparar el valor más alto conseguido para cada formulación (MP0 y MP1), en ambos casos desciende un 47%, al ser tratados a 300 °C.

El aumento en la resistencia a la compresión que mostraron los MP0 tratados a 200 °C y en los MP1 tratados a 100 °C, puede atribuirse a una post-reticulación en el material. Una serie de autores a pesar de haber curado la resina de poliéster insaturada mediante una iniciación química, han recurrido a un post-curado térmico, debido a que en la polimerización por radicales libres que tiene lugar durante el curado, se detiene cuando los radicales libres no pueden encontrar nuevos dobles enlaces. Un aumento de la temperatura durante el proceso de curado permitirá una mayor movilidad y la creación de más radicales libres. En la Tabla



3.4 se muestran las condiciones a las cuales diversos autores han recurrido a un post-curado térmico [20, 21, 41, 45, 47, 49, 91, 92]. En resumen, mediante un curado óptimo se obtienen polímeros con mayor número de reticulaciones, lo que conduce a un incremento en las propiedades mecánicas [93], con esto se puede alcanzar la resistencia máxima del concreto o mortero polimérico, como se presentó en los morteros MP0 tratados a 200 °C y en el MP tratado a 100 °C.

Tabla 3.4. Post-curado efectuado por diferentes autores en morteros poliméricos de resina de poliéster insaturada.

Referencia	Post-curado térmico
Evans et al. (1996)	La resina se curó durante 24 h a temperatura ambiente seguido de 3 h en un horno a 80 °C.
Aslan et al. (1997)	La resina se mantuvo durante 12 h en un baño de agua a 70 °C y luego se curaron posteriormente a 100 °C durante 2 h.
Evans et al. (1997)	La resina fue post-curada a 150 °C durante 3 h.
El-Hawary et al. (2000)	Las muestras se dejaron curar a temperatura ambiente durante 28 días, después se calentaron en un horno a 100 °C, 150 °C y 200 °C durante 6 h.
Ribeiro et al. (2004)	Las muestras se dejaron curar, durante 7 días a temperatura ambiente y luego se curaron posteriormente a 80 °C durante 3 h.
Worzakowska (2009)	Las resinas se curaron en un horno a 80 °C durante 5 h , seguido de post-curado sucesivo a 100 °C durante 5 h, a 140 °C durante 5 h y finalmente a 180 °C durante 5 h.
Reis et al. (2011)	Las muestras se curaron inicialmente a temperatura ambiente y después se curaron por 3 h a 60 °C.
Zhang et al. (2013)	La resina se calentó por etapas: 100 °C (2 h), 120 °C (2 h) y 140 °C (1 h).
Heidari-Rarani et al. (2014)	Las muestras se curaron a temperatura ambiente durante 7 días y después se curaron durante 2 h a 80 °C
Paluvai et al. (2015)	La resina se mantuvo a temperatura ambiente durante 24 h, a 80 °C durante 4 h y después del curado se realizó a 110 °C durante 2 h.

Específicamente no hay una temperatura de curado y un período específico para llevar a cabo un post-curado térmico que permita garantizar un desarrollo óptimo de la resistencia del concreto o mortero polimérico, ya que depende del tipo de resina empleada, la relación

resina de poliéster insaturada-estireno, cantidad de iniciador y acelerador. Por ejemplo, Nur et al. realizaron una investigación para determinar la temperatura de post-curado óptima y el período de tiempo necesarios para un concreto polimérico de resina de poliéster insaturada [39]. Este concreto tenía una resistencia a la compresión superior después de someterse a un período de curado por debajo de los 100 °C. En particular, se ha demostrado que cuando se alcanza una temperatura por encima de los 100 °C en sistemas de resina de poliéster reticulados con estireno que han sido curados con una iniciación química, se logra el 100% de la conversión de los sitios insaturados de la resina de poliéster [94, 95]. Esta temperatura coincide con la temperatura de inicio de la reacción de reticulación de la resina de poliéster insaturada cuando solo se usa iniciador en el proceso de curado [41, 43].

Otro aspecto a considerar es la cantidad de iniciador y acelerador empleada en los morteros elaborados, la cual es la sugerida por el proveedor, sin embargo, esto no asegura que la porción de iniciador y/o de acelerador aplicada sea la óptima; de modo que, si aún existe cierta cantidad de iniciador sin reaccionar después del curado a temperatura ambiente, al momento de tratar los morteros a temperaturas por encima de 100 °C se podría asegurar que se logra completar la reticulación en los morteros poliméricos. Por lo tanto, la cantidad de reticulaciones del aglutinante polimérico aumenta y se reduce la movilidad de las cadenas poliméricas de la resina de poliéster que conforma el mortero y como consecuencia, se mejoran las resistencias para ambas formulaciones. Por otro lado, si la cantidad de iniciador no es la suficiente, la reticulación de una resina de poliéster insaturada con estireno en ausencia de un iniciador ocurre en un rango de temperatura de 180-210 °C [96]. Es por esto que en los morteros que no contienen partículas de PET (MP0) a 200 °C mejoró aún más la resistencia a la compresión. Caso contrario que en los MP1 que disminuyó la resistencia mecánica, esto debido a cambios físicos generados en las partículas de desecho de PET y por la degradación térmica de la resina de poliéster.

### **3.3.2. Resistencia a la flexión de los morteros poliméricos tratados térmicamente.**

Se ha llevado a cabo investigación sobre el comportamiento mecánico de morteros poliméricos a temperaturas por encima de la temperatura ambiente, en general, se ha concluido que el efecto de temperaturas arriba de 25 °C resulta solo en una pequeña disminución en la resistencia a la compresión, pero una disminución relativamente grande en la resistencia a la flexión [4, 20, 97], por esta razón se realizaron ensayos de flexión en los

morteros MP0 y MP1 tratados térmicamente. Además, se debe considerar la sustitución de los agregados naturales por partículas de desechos plásticos, con el fin de conocer su desempeño mecánico, cuando se tienen partículas con diferente geometría que los agregados naturales.

Los resultados de los ensayos de resistencia a la flexión de 3 puntos de los MP0 y MP1, antes y después de los tratamientos térmicos, se muestran en la Tabla 3.5. En los MP0 no se muestra un cambio significativo, entre las resistencias obtenidas a 40 °C y 100 °C solo varía un  $\pm 2\%$  con respecto al mortero de control; hasta que la temperatura de tratamiento alcanza los 200 °C, el material pierde cerca del 30% de su resistencia a la flexión.

Tabla 3.5. Resultados de resistencia a la flexión de los morteros poliméricos.

Temperatura (°C)	MP0		MP1	
	MPa	$\sigma$	MPa	$\sigma$
25	23.67	1.18	23.13	1.98
40	23.93	0.55	23.72	1.55
100	23.21	1.19	19.47	2.87
200	16.88	1.06	7.70	1.16

El comportamiento que mostró el MP1 frente a los tratamientos fue distinto, con un calentamiento a 40 °C la resistencia únicamente aumentó un 2%, a partir de 100 °C comenzó a decaer un 15% y cuando se trataron a 200 °C la resistencia a la flexión decayó drásticamente a un 70%, precisamente en estas muestras las grietas fueron más evidentes, incluso se presentó desprendimiento de material en las bordes del mortero polimérico después del tratamiento térmico, en la Fig. 3.4 se muestran los morteros poliméricos tratados térmicamente, así como el mortero de control, donde se observan los cambios físicos realizados por el calentamiento a las diferentes temperaturas. En el mortero MP1 a 25 °C la superficie se observa lisa y libre de grietas, en cambio en el MP1 200 °C, se observan grietas en el material, las cuales se generaron debido al tratamiento térmico.

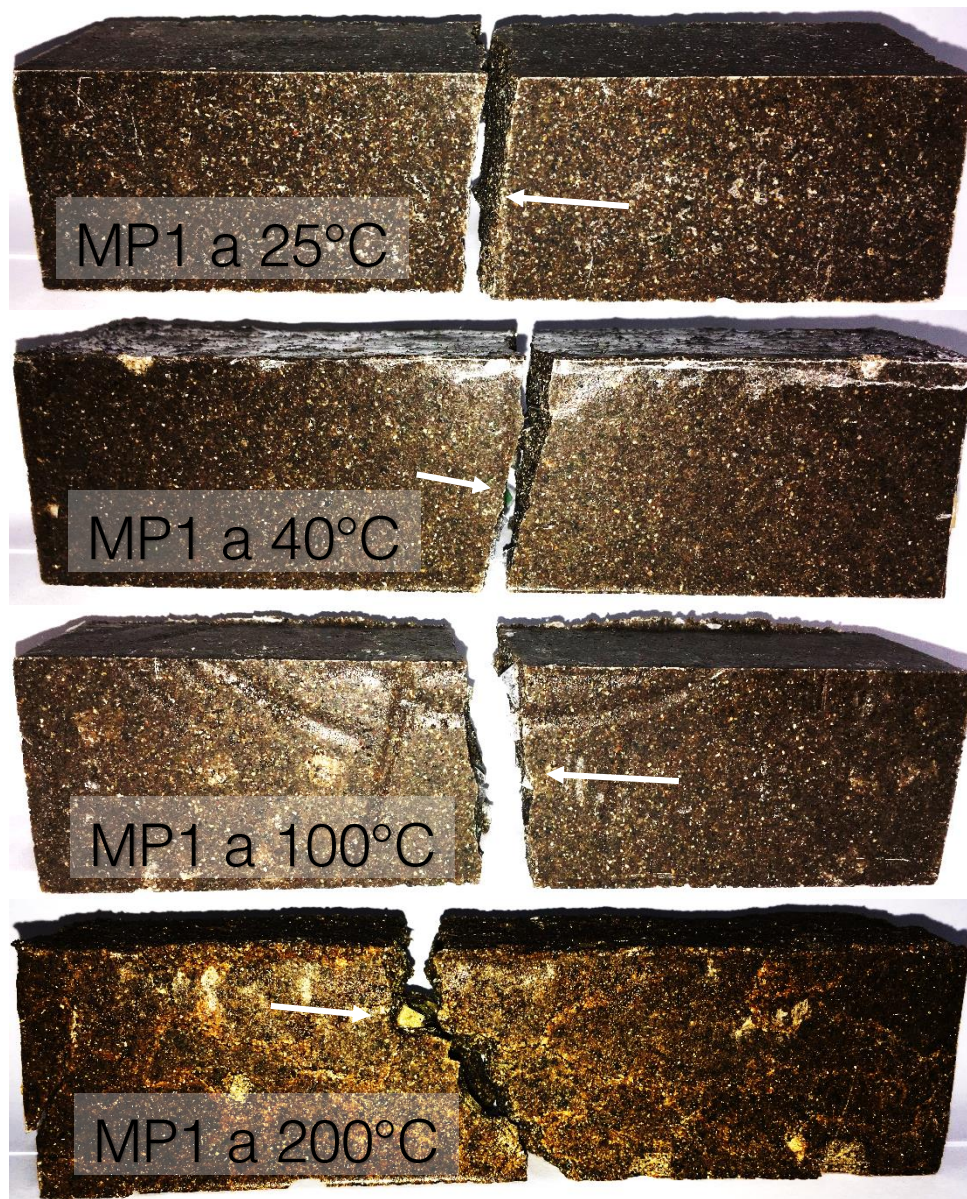


Figura 3.4. Probetas de morteros poliméricos (MP1) después del tratamiento térmico y el ensayo de flexión.

Solo se realizaron morteros para hacer ensayos de resistencia a la flexión a temperatura ambiente, 40 °C, 100 °C y 200 °C, debido a que en los morteros ensayados no se observa un aumento importante en la resistencia a la flexión con la temperatura, por el contrario, se presenta una reducción al incrementar las temperaturas de tratamiento. Este comportamiento mecánico es similar a lo presentado por los siguientes autores, por ejemplo Reis realizó mediciones de resistencia a la flexión en temperaturas que varían desde temperatura ambiente hasta 90 °C, entre la temperatura ambiente y 50 °C, se observa una mínima pérdida en la resistencia a la flexión, a partir de esa temperatura disminuye la resistencia a la flexión hasta un 90% [5] y Ribeiro et al. realizaron los ensayos en temperaturas de 10 °C a 100 °C,

la resistencia a la flexión no se ve afectada significativamente dentro del rango de temperatura entre 20 °C y 40 °C. Para temperaturas más altas, se produce una disminución gradual de la resistencia a la flexión [20], estos ensayos son en morteros de resina de poliéster insaturada y sin sustitución de partículas de desecho, lo cual concuerda con lo obtenido en esta investigación.

La fractura que presentan las muestras de MP se vuelve frágil al incrementar la temperatura de tratamiento térmico, promoviendo su tendencia de los materiales termoestables a una fractura rápida; uno de los inconvenientes de las resinas de poliéster insaturadas es su baja resistencia a la propagación de grietas debido al alto grado de reticulación [41, 50]; esta fragilidad en los materiales termoestables es debido a la reticulación entre las cadenas poliméricas, resultando en una fragilidad excesiva como consecuencia de una movilidad molecular reducida y es principalmente responsable de la formación de microgrietas [17]. La fractura para las muestras analizadas 25 °C y 40 °C fueron generalmente rectas sin ninguna curvatura significativa, ver Fig. 3.5. Al incrementar la temperatura del tratamiento a 100 °C y 200 °C aumentará la cantidad de reticulaciones en el material, por esto las muestras experimentaron una propagación de grietas y la grieta fue irregular, en comparación con los MP0.

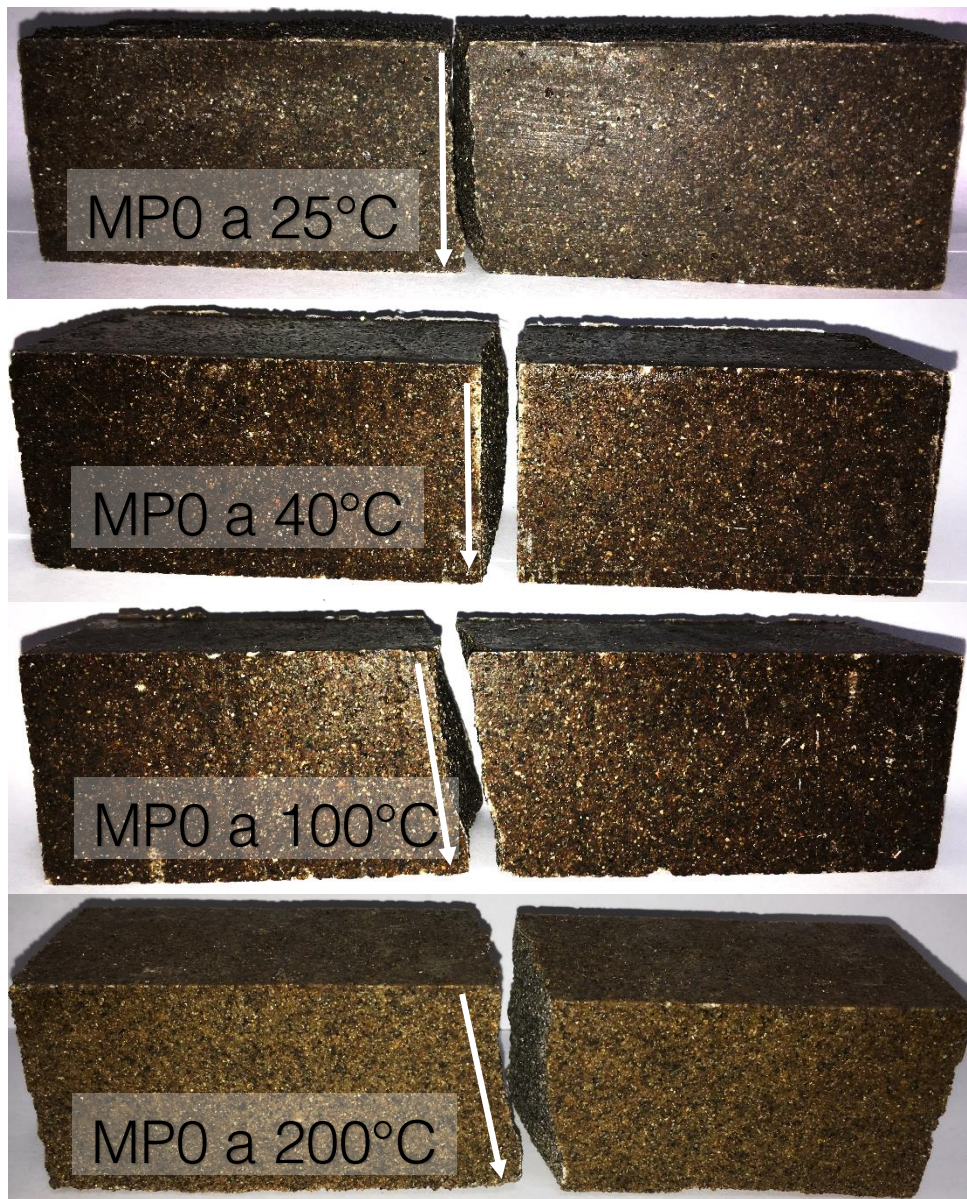


Figura 3.5. Probetas de morteros poliméricos (MP1) después de cada tratamiento térmico y el ensayo de flexión.

Al considerar morteros con residuos de PET, los resultados de la resistencia a la flexión presentados por Albano et al. indican que la sustitución de arena por residuos de PET particulados en morteros de resina de poliéster insaturada, contribuyen a una disminución de la resistencia a la flexión [54], de igual manera en los MP1, el valor de la resistencia a la flexión fue descendiendo en cada tratamiento térmico, debido a la presencia de las partículas de desecho de PET. Esta variación en las propiedades mecánicas se puede atribuir a la diferencia de forma y rigidez del agregado, ya que el PET tiene una forma plana y rectangular con características suaves, diferentes de la arena, que es redonda y rígida [14].

A diferencia de los ensayos de compresión, donde la presencia de las partículas de desecho de PET aumentaron la resistencia en el material, en los ensayos de flexión las partículas de PET, promovieron la formación de grietas favoreciendo la falla del mismo, facilitando la propagación de la grieta provocada por la carga aplicada por el equipo. La trayectoria de la fractura en las muestras tratadas térmicamente comenzó desde la punta de la grieta y luego se extendió a lo largo de la dirección de la grieta inicial y terminó en la ubicación de la carga aplicada en los morteros MP0. Un estudio reveló que el microagrietamiento se produce en la matriz polimérica transversal a las partículas [17], particularmente a lo largo de la interfaz de partículas-matriz donde no hay ningún obstáculo. La grieta rodea la partícula sin romper la unión interfacial partícula-matriz, esto se puede observar en Fig. 3.4, las partículas de PET no se rompieron o trozaron, permanecen adheridas a la matriz, las cuales están señaladas mediante flechas blancas.

### **3.4. Degradación térmica de los morteros poliméricos.**

Antes de describir los cambios ocurridos en los morteros poliméricos se abordará el proceso de degradación térmica de la resina de poliéster insaturada. La degradación térmica de los morteros poliméricos provoca la pérdida de propiedades mecánicas y físicas, las cuales caracterizan a estos materiales, por ejemplo las elevadas resistencias mecánicas y la baja permeabilidad frente a soluciones agresivas y humedad [2].

#### **3.4.1. Degradación térmica de un poliéster.**

Los cambios físicos y químicos ocurridos en los morteros poliméricos son debidos a los cambios volumétricos ocurridos en las partículas de PET y en la descomposición térmica de la resina de poliéster insaturada, mediante la cual se produce una modificación de las especies químicas causado por el calor. Entre los diversos procesos físicos que ocurren durante la descomposición térmica pueden depender de la naturaleza del material. Por ejemplo, como los materiales poliméricos termoestables son infusibles e insolubles una vez que se han formado, no es posible cambios de fase con el calentamiento. Los termoplásticos, por otro lado, se pueden suavizar calentando sin cambios irreversibles en el material, siempre que el calentamiento no exceda la temperatura mínima de descomposición térmica [19].

Cuando los materiales poliméricos son sometidos a altas temperaturas, es decir entre 300-1000 °C, se presentan una serie de cambios [98]. El primero de los cambios ocurridos es la pirólisis de la matriz polimérica, que conduce a la formación de una gran cantidad de poros

lentos de productos gaseosos. En relación a los polímeros usados en los morteros MP0 y MP1, los cuales son poliésteres tienen una estructura relativamente simple compuesta solamente de átomos de carbono, oxígeno e hidrógeno en un anillo de benceno con CH<sub>2</sub> unido mediante enlaces carbono-oxígeno, Fig. 3.6 [99].

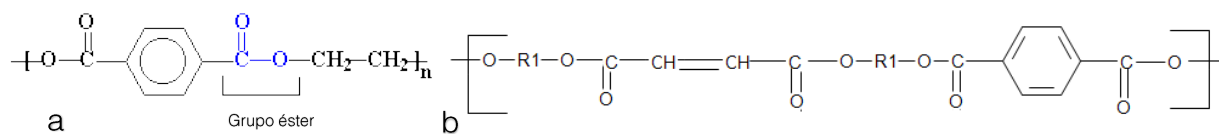


Figura 3.6. Estructura química de a. Politereftalato de etileno y b. Resina de poliéster insaturada.

Esta estructura química indica que, tras la descomposición térmica de las especies que los conforman, los productos gaseosos serían diversos compuestos de hidrocarburos e hidrocarburos oxigenados, así como CO, CO<sub>2</sub> y agua. Además, se forma una nueva fase sólida rica en carbono. El proceso de formación de una nueva fase sólida y pirólisis se denomina usualmente carbonización, como se puede observar en la superficie de los morteros poliméricos, ver Fig. 3.7. Los gases se filtran por los poros y pasan parcialmente al medio ambiente. Sin embargo, bajo ciertas condiciones, los gases no tienen tiempo suficiente para filtrarse, lo que resulta en la acumulación en el interior del poro, generando una gran presión, estos productos gaseosos pueden generar microgrietas en el material [100], como se muestra en la Fig. 3.7, en donde se indican mediante flechas blancas. El microagrietamiento de la matriz puede alterar las propiedades mecánicas tales como resistencia, rigidez y estabilidad dimensional dependiendo del tipo de material.



Figura 3.7. Morteros MP0 después de un tiempo de exposición de 3 h a 300 °C.

La degradación térmica se lleva a cabo mediante una compleja serie de reacciones químicas que se producen ya sea en la fase condensada (mortero polimérico) o en la fase gaseosa (productos gaseosos) por encima del sustrato polimérico. En general, la degradación térmica inicial de la resina de poliéster parece ser debida a la escisión aleatoria del enlace éster y a



la pirólisis de los ésteres simples producidos [43, 99, 101]. Los grupos terminales recién formados se descomponen por reacciones secundarias [99].

Se ha reportado que en una resina de poliéster reticulada con monómero de estireno, muestra un proceso de degradación térmica en aire que consta de tres etapas [42, 49, 101, 102]. En la Tabla 3.6 se proporciona información sobre las etapas de descomposición y los intervalos de temperatura correspondientes, aunque se trata de resina de poliéster insaturada, las temperaturas de las etapas cambian de una resina a otra, es por esto que se presentan dos valores de temperaturas reportadas por Ying [42] y Kandare [102] para ejemplificar las etapas de degradación. La degradación ocurre en tres etapas; (i) la primera etapa que muestra una pérdida de masa atribuida a la pérdida de agua por deshidratación, seguida de (ii) la escisión aleatoria del enlace éster de las cadenas de poliéster que contribuyen a una pérdida de masa del 80%, causada por la liberación de estireno y una mezcla compleja de otros materiales, anhídrido ftálico, CO y CO<sub>2</sub> y (iii) una etapa de oxidación de carbón formado que contribuye con una pérdida de masa del 8% y deja 4% de carbón residual a 800 °C [42, 91, 101, 102].

Tabla 3.6. Etapas de descomposición térmica de la resina de poliéster.

1a etapa		2da etapa		3a etapa	
Rango de temperatura (°C)	% masa pérdida	Rango de temperatura (°C)	% masa pérdida	Rango de temperatura (°C)	% masa pérdida
120-275	8	275-460	80	460-600	8
200-330	No reportado	300-420	No reportado	550-600	No reportado

Entre los principales productos de descomposición se encuentran anhídrido ftálico, acetaldehído, agua, monóxido de carbono y el dióxido de carbono, aunque también se detectaron estireno y sus derivados (dímero de estireno y trímero y productos de degradación de estireno como benzaldehído, tolueno, etilbenceno y fenilacetaldehído y ftalato de dimetilo) [43, 101]. Estos productos volátiles se producen en mayor medida a temperaturas más altas, originando mayor porosidad (agujeros) y esfuerzos térmicos en el mortero. En la Tabla 3.7 se enlistan los productos gaseosos detectados en la degradación térmica de resinas de poliéster, de los cuales algunos probablemente hayan sido desprendidos en la resina de poliéster insaturada utilizada en este trabajo.

Tabla 3.7. Productos gaseosos detectados en la degradación térmica de la resina de poliéster.

Productos		
Benzaldehído [43, 49, 91, 99, 101]	Benceno-3- butenil [102]	Tolueno [43, 99, 102]
Dióxido de carbono [99, 102]	Propil benceno [102]	Acetileno [99]
Monóxido de carbono [99]	Fenilacetaldehído [43]	Trímero de estireno [43]
Anhídrido ftálico [99, 102]	2-Fenil propanal [102]	Dímero etileno benceno [99, 102]
Estireno [43, 99, 102]	1-Fenil-ácido benzoico [102]	Etilbenceno [43, 102]
Benceno 2-propenil [101, 102]	2-Metil hidracina [102]	Acetona [99, 102]
Ftalato de dimetilo [43, 102]	$\alpha$ -Metil estireno [102]	Butaldehído [99]
P-terfenil [43, 49, 91, 99, 101]	2-Fenil oxitano [102]	Butano [99]
Alcohol alílico [99]	Acetaldehído [99]	Buteno [99]
Benceno [99, 101]	Agua [99]	1,4-Difenil-1,3 butadieno [49, 102]
Acido benzoico [49, 99, 102]	Etanona-2-formiloxi [49, 102]	Ciclobutona [99]
Butadieno [99]	Fenil éster [102]	Ciclohexadieno [99]
Propanal [101]	N-aminoftalamida [49, 91, 102]	Ciclohexano [99]
Benceno 1,2 dimetil [101]	1,4-Difenil-1,3 butadieno [49, 91, 102]	Ciclohexanona [99]

Un mecanismo de deterioro de la resina poliéster provocado por los tratamientos térmicos puede ser el propuesto por Ravey, en el cual expone la formación del anhídrido ftálico como un producto de reordenamiento de radicales libres formado por escisión en el oxígeno del carbonilo. El mecanismo Ravey presentado en la Fig. 3.8 explica la formación de anhídrido ftálico [102]. De acuerdo con la proposición de Ravey, el anhídrido ftálico se elimina de la cadena de poliéster seguido de la combinación de radicales resultantes para formar un enlace éter. Esto es seguido por la división de la cadena para formar Ácido 2-propenoico, 3 fenil-(E) como uno de los productos.

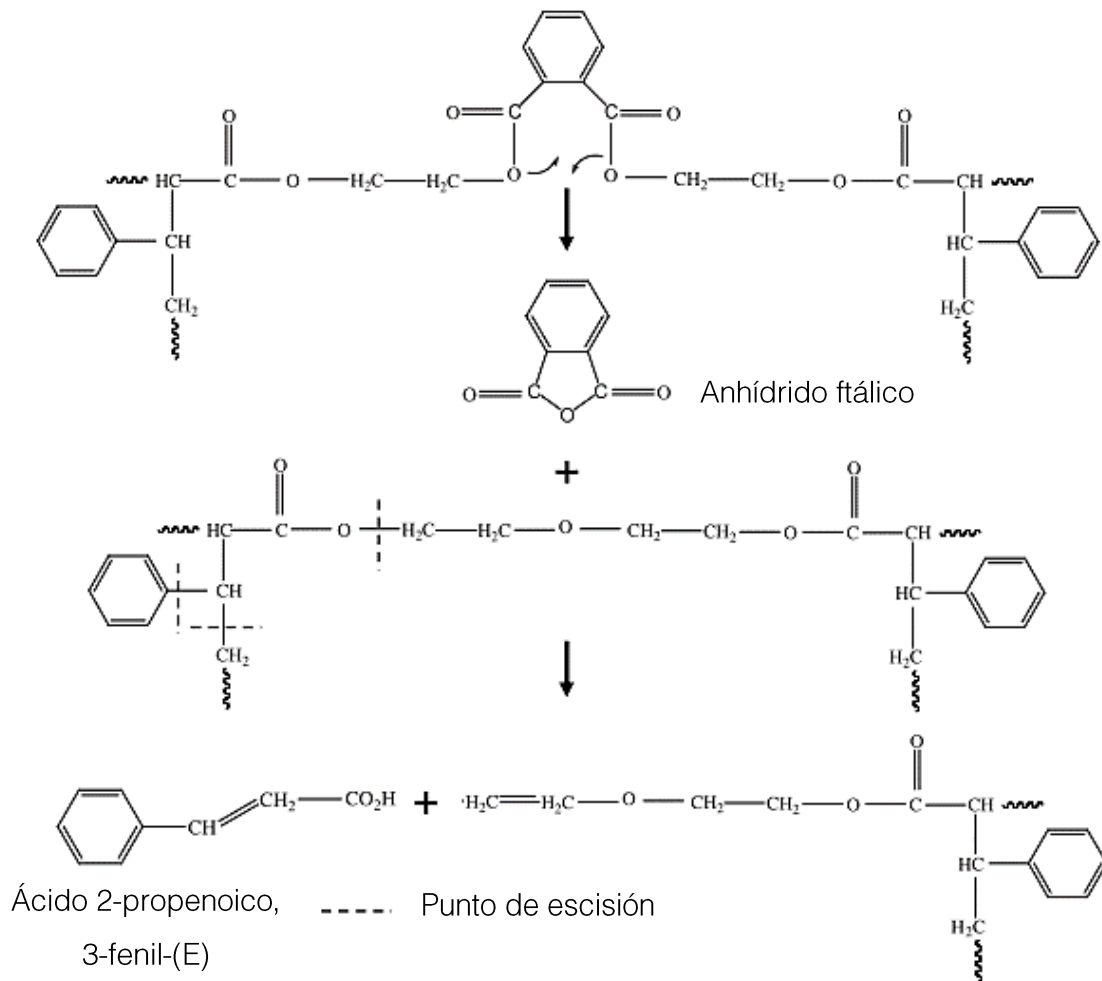


Figura 3.8. Mecanismo de deterioro de la resina poliéster.

Indudablemente los morteros poliméricos estuvieron sometidos a las temperaturas en donde inicia la descomposición térmica de la resina. Es por esto que empezó a descender la resistencia a la compresión, porque al irse degradando la resina, la cual es la matriz de los morteros, ésta ya no transmitió eficientemente las cargas al relleno y ya no proporcionó cohesión entre los agregados, es decir, la arena y las partículas de desecho de PET, generando que el material fallara a una menor carga en el ensayo.

La Tabla 3.8 muestra los valores de pérdida de masa de los morteros MP0 y MP1 antes de ser sometidos a 300 °C y después de este tratamiento, se podría considerar las temperaturas de las etapas de la Tabla 3.6, los MP0 y MP1 tratados a 300 °C culminaron la etapa 1 y el inicio de la etapa 2. El MP1 presentó una pérdida de masa menor, esto se puede relacionar a que contiene partículas de PET, de acuerdo a Rebeiz, los residuos de PET reducen notablemente la transmisión térmica (o mejoran las propiedades de aislamiento) del concreto

[44]. Estas partículas ayudaron a reducir la transmisión de calor hacia la resina de poliéster, reduciendo la degradación de los morteros.

Tabla 3.8. Relación de pérdida de masa de los morteros poliméricos.

Formulación	Masa inicial (g)	Masa después de tratamiento de 300 °C (g)	% Masa pérdida
MP0	245.50	227.0	7.52
MP1	247.93	238.2	3.91

El PET es un poliéster que se degrada en 3 etapas, de igual manera que las resinas de poliéster insaturada [99], mediante una serie de reacciones diferentes que ocurren simultánea o consecutivamente. Los principales productos de la degradación del politereftalato de etileno son el dióxido de carbono, el acetaldehído y el ácido tereftálico [28]. Además, se pueden detectar trazas de anhídridos, ácido benzoico, ácido p-acetilbenzoico, acetofenona, benzoato de vinilo, agua, metano, etileno, acetileno y algunas cetonas; siendo el producto de descomposición primario el acetaldehído, representando 80% en moles de los gases totales [28, 91, 99, 103]. La etapa inicial de degradación térmica es la escisión aleatoria del enlace éster dentro de la cadena [71]. Esta escisión puede producir gran cantidad de sustancias gaseosas diferentes (productos primarios), que reaccionan entre sí o con oxígeno, si la descomposición se produce en una atmósfera de aire [103]. En la Tabla 3.9 se detallan las temperaturas en las cuales se presentan los cambios en el PET [104].

Tabla 3.9. Datos del Politereftalato de etileno.

Propiedades	Temperatura (°C)
Temperatura de transición vítrea	74.4 ± 1.6
Punto de fusión	243.3 ± 5.0
Temperatura de descomposición inicial en el aire (pérdida de masa del 5%)	379.2 ± 5.2

A las temperaturas de tratamiento de los morteros MP1, la máxima temperatura fue de 300 °C, considerando que el PET es estable químicamente hasta 350 °C, a partir de esta temperatura, comienza su descomposición, completándose aproximadamente a 410 °C, en la cual se alcanza una pérdida de masa del 84% [8]. Por lo tanto, se puede inferir que las partículas de desecho de PET no se degradaron térmicamente en los MP1, presentándose principalmente la degradación en la resina de poliéster.

### 3.5. Análisis de la estructura de la resina de poliéster insaturada mediante FTIR.

Las resinas de poliéster insaturadas fueron caracterizadas mediante FTIR, con el fin de identificar cambios en la estructura de la resina después de cada tratamiento térmico, en primer lugar, se identificó la resina de poliéster sin tratamiento térmico. En la Tabla 3.10, se encuentran indicadas las principales bandas de absorción características de los grupos funcionales de la resina de poliéster insaturada reticuladas con monómero de estireno, existen bandas secundarias que complementan la identificación de los grupo funcionales, en la siguiente tabla solo se muestras las más representativas [7, 42, 43, 45, 94, 105, 106].

Tabla 3.10. Bandas características de una resina poliéster.

Identificación	Absorciones (cm <sup>-1</sup> )	Grupo funcional
A	2921	-CH <sub>2</sub>
B	2847	-C-H
C	1718	-C=O (éster)
D	1455	-CH <sub>2</sub> (estireno)
E	1248	-C-O-C-
	1118	
	1056	
F	746	-C-H (anillo benceno)
	702	

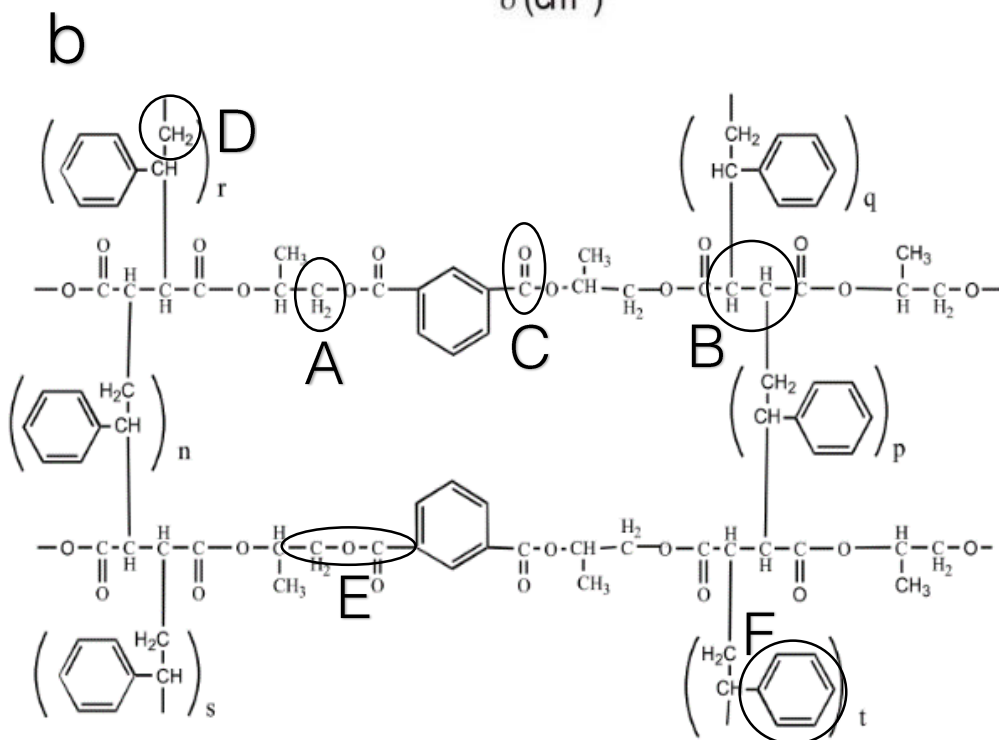
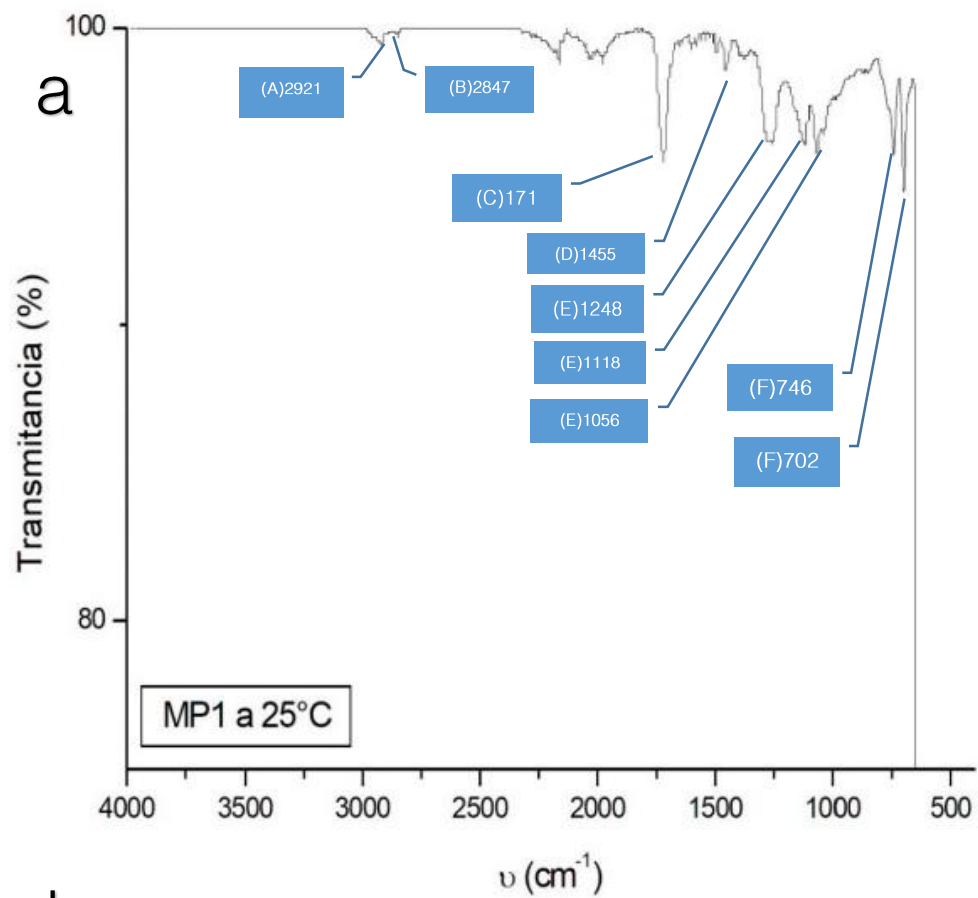


Figura 3.9. Espectro infrarrojo de la resina de poliéster curada (a) y estructura de la resina de poliéster reticulada con estireno (b).

En la Fig. 3.9a se puede observar el espectro FTIR de la resina de poliéster insaturada, y en la Fig. 3.9b una representación esquemática de la estructura de la resina de poliéster insaturada reticulada con monómero de estireno; se etiquetaron los grupos funcionales (letras A-F) que fueron identificados en el espectro con el propósito de señalar el grupo funcional correspondiente a cada una de las bandas presentes. Se puede observar que los grupos funcionales principales de una resina de poliéster insaturada están presentes en el espectro, lo que confirma el curado de la resina.

Algunos autores confirman el curado de la resina, mediante la intensidad de la banda que aparecen en  $2847\text{ cm}^{-1}$  [105, 107]. La banda perteneciente a  $2847\text{ cm}^{-1}$  representa que se efectuó la reticulación de la resina, en la Fig. 3.10 se esquematiza el proceso de curado de la resina, en la Fig. 3.10a se encuentra la resina con insaturaciones y al adicionar el estireno, este se une en este doble enlace logrando la reticulación, entonces el grupo funcional  $-\text{CH}=\text{CH}-$  cambia a  $-\text{CH}-$ , ver Fig. 3.10b. Con la presencia de este grupo funcional se asegura que se formó la estructura tridimensional que caracteriza un termoestable.

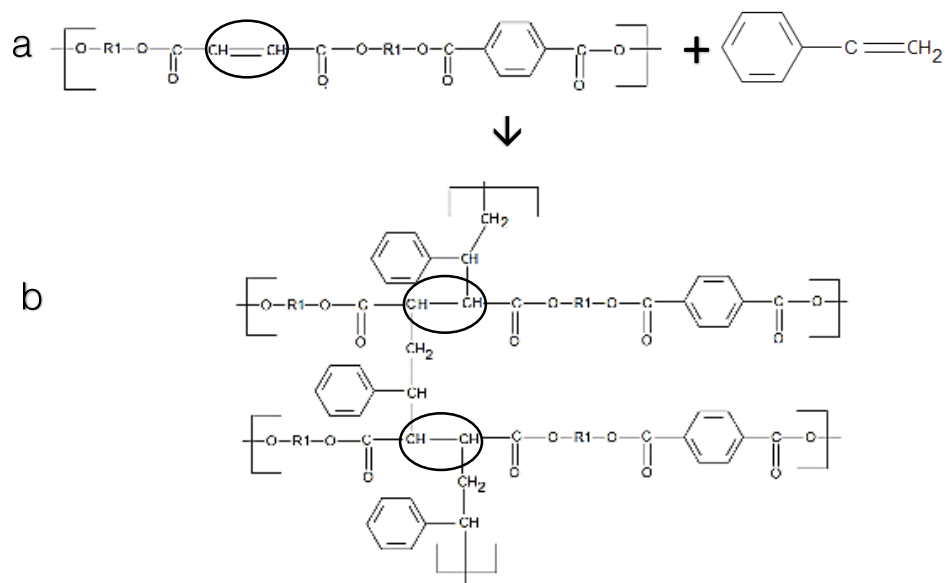


Figura 3.10. Esquema de la reticulación de una resina de poliéster insaturada.

Las bandas de absorción características de la resina de poliéster fueron evidentes a temperatura ambiente, pero a medida que la temperatura de tratamiento aumentaba, continuaron apareciendo, pero con una intensidad más marcada, como se puede observar en Fig.3.11a y Fig.3.11b, en las cuales están indicadas con elipses. La intensidad de una banda de absorción es proporcional a la concentración del compuesto, al tratar la resina a

40 °C y 100 °C, se favoreció el desarrollo de la estructura de la resina, incrementando la intensidad de las bandas, entre un 5% y 20% de Transmitancia. Sin embargo, con las temperaturas de tratamiento de 200 °C y 300°C, la intensidad de las bandas características de absorción se redujo drásticamente entre un 10% y 25% de Transmitancia (ver Fig.3.11c y Fig.3.11d).

Este mismo comportamiento lo reporta Zhang en su estudio, donde sometió una resina de poliéster a temperaturas por encima de 300 °C observando que las bandas características de la resina se debilitaron claramente después del calentamiento [108]. Yu indica que esto es debido principalmente al inicio de la degradación térmico-oxidativa de las cadenas de poliéster [42]. Las bandas de absorción a  $746\text{ cm}^{-1}$  y  $702\text{ cm}^{-1}$  se intensifican al aumentar la temperatura de 200 °C a 300 °C (ver elipse amarilla en Fig. 3.11d), indicando la formación de residuos carbonosos durante la pirólisis del material [42].

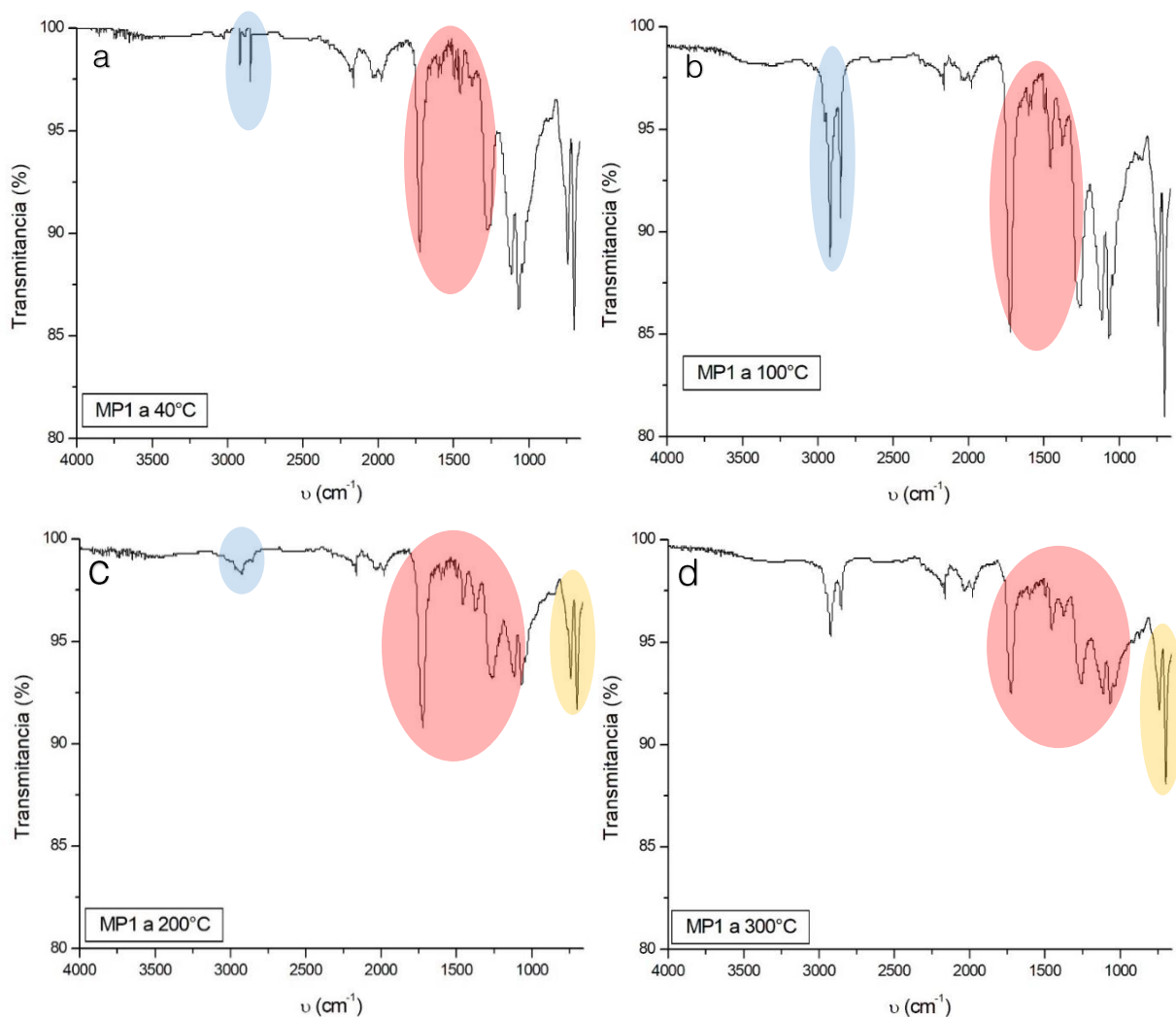


Figura 3.11. Espectro infrarrojo de la resina de poliéster curada, a. Tratada a 40 °C, b. Tratada a 100 °C, c. Tratada a 200 °C y d. Tratada a 300 °C.



### **3.6. Análisis de la microestructura de los morteros poliméricos tratados térmicamente.**

En esta sección se discutirán los cambios en la microestructura de los morteros poliméricos sin y con partículas de PET, mediante la técnica de microscopía electrónica de barrido (MEB) y microscopía estereoscópica. Todas las imágenes se tomaron de fragmentos de MP0 y MP1 ensayados a la compresión.

#### **3.6.1. Desarrollo de la matriz polimérica y las partículas de PET**

Se ha demostrado que es necesario un post-curado térmico para completar las reacciones de polimerización y, en consecuencia, esto mejora la unión entre los componentes. En la Fig. 3.12 se presenta el aspecto superficial de los morteros expuestos a distintas temperaturas. A 25 °C, 40 °C y 100 °C (Fig. 3.12 a-c) se puede observar un buen mojado de la arena inmersa en la resina de poliéster, también se aprecia la presencia de poros sin forma definida, con tamaños aproximados a 0.5 mm distribuidos de manera uniforme en toda la matriz. Al incrementar la temperatura a 200 °C (Fig. 3.12d) se observa una matriz más homogénea, con un menor contenido de poros en la superficie; la resina de poliéster embebió completamente el agregado mineral corroborando el proceso de post-curado mencionado anteriormente en la sección 3.3.1. Finalmente, a una temperatura de 300 °C (Fig. 3.12e), se puede observar la pérdida de la resina, quedando expuestas las partículas de arena en la superficie, lo cual puede atribuirse a los efectos de carbonización durante la degradación térmica en la matriz polimérica.

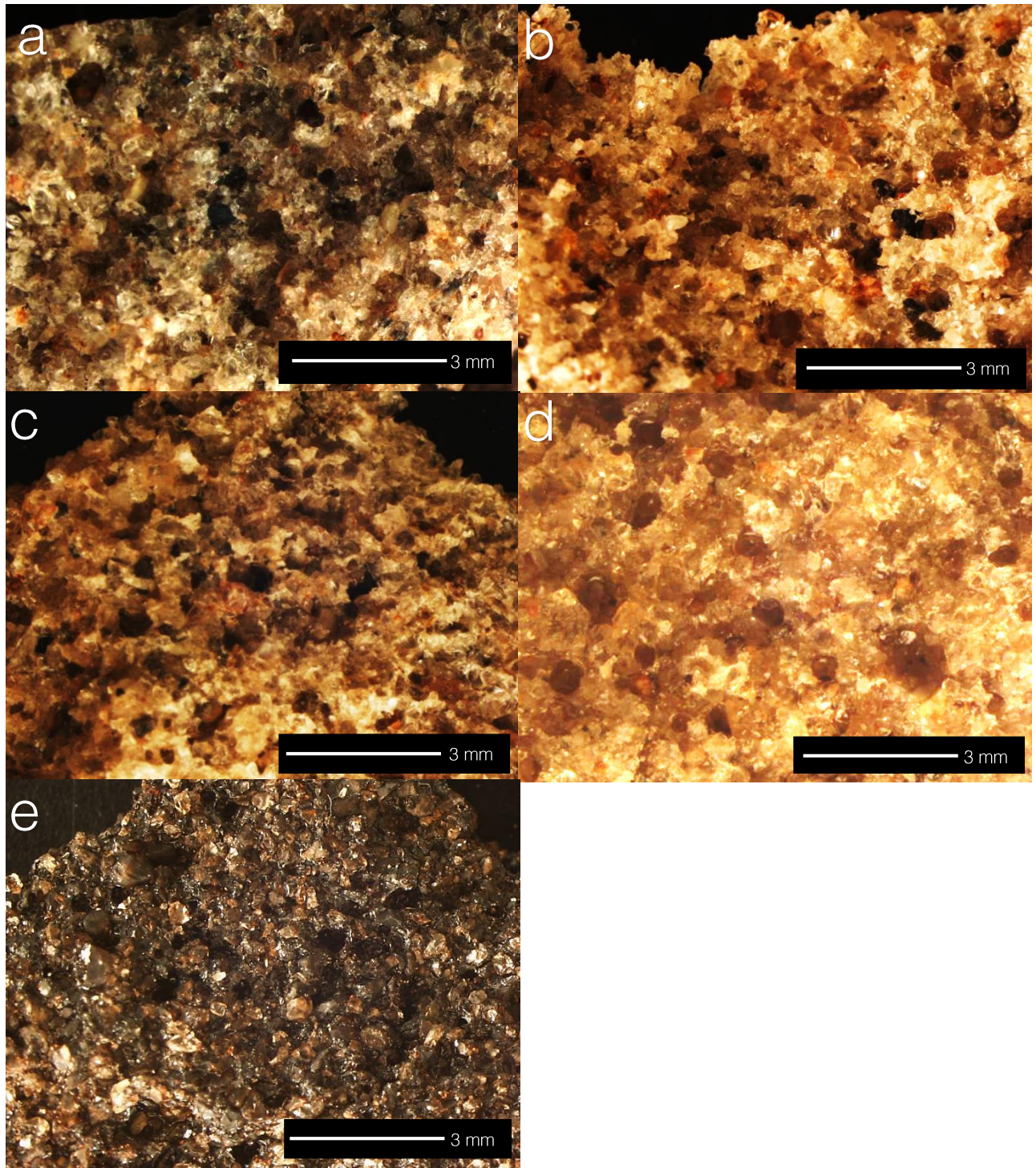


Figura 3.12. Micrografías de morteros poliméricos (MP0), a. Temperatura ambiente, después de un tratamiento a b. 40 °C, c. 100 °C, d. 200 °C y e. 300 °C.

El post-curado aplicado en los morteros poliméricos, permitió desarrollar la unión interfacial entre la matriz y las partículas de desecho de PET, como se puede observar en la Fig. 3.13, indicado mediante flechas blancas. La mejora en las interacciones de matriz-partículas de PET, se puede atribuir al calentamiento. Antes de cualquier tratamiento térmico, la adherencia de la partícula de PET a la matriz polimérica se observa que es uniforme, conforme se aumenta la temperatura, los cambios físicos ocurridos en las partículas de PET, permiten que se adhieran mejor al mortero, Fig. 3.13d. Por adhesión, se entiende al estado en el que dos cuerpos diferentes se mantienen unidos mediante un contacto interfacial íntimo, de modo que las fuerzas mecánicas pueden transferirse a través de la interfaz. Las fuerzas interfaciales que sostienen las dos fases juntas pueden surgir de las fuerzas de Van der Waals, enlace químico, o atracción electrostática [109].

Si se compara la superficie de la partícula de PET en la Fig. 3.13a se observa completamente lisa, pero en Fig. 3.13c y 3.13d se percibe un cambio en la superficie, ya que al ir mejorando la adhesión al mortero, se fija mejor al agregado (arena); se puede observar como la partícula de PET pasó de tener una superficie lisa a una, con cierto grado de rugosidad, debido a los granos de arena. A 300 °C la partícula de PET se adhirió completamente en la matriz, incluso se percibe como tomó la forma de los poros del mortero, esto se indica mediante flechas en la Fig. 3.13d. Martínez-López et al. atribuyen el incremento observado en la resistencia a la compresión al desarrollo de una adhesión interfacial entre la matriz y los componentes del mortero [46]. Por esto al incrementar la temperatura del tratamiento (200 °C) se presentó una mejora en la resistencia a la compresión en los MP1 (sección 3.3.1).

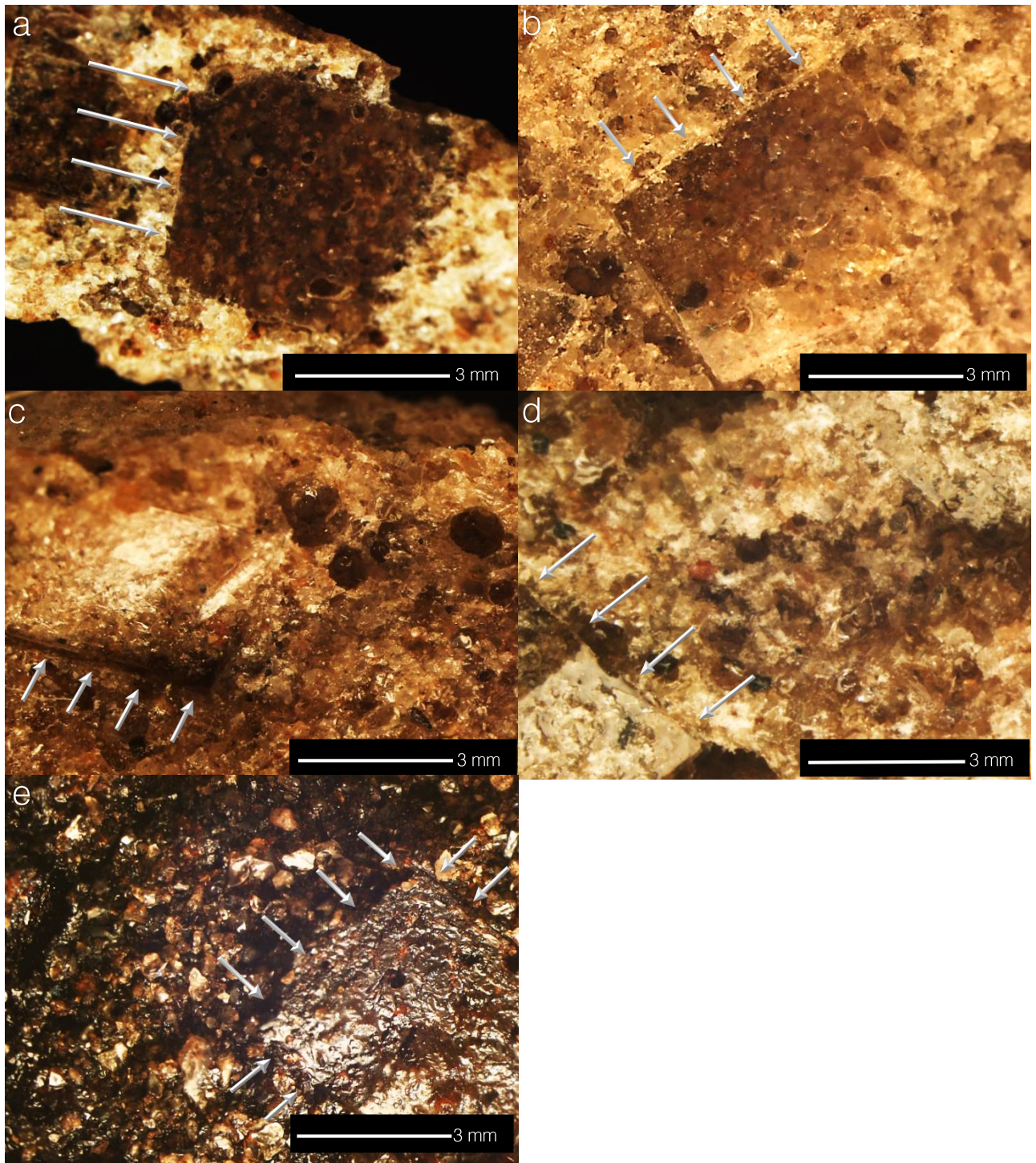


Figura 3.13. Micrografías de morteros poliméricos (MP1), a. Temperatura ambiente, después de un tratamiento a b. 40 °C, c. 100°C, d. 200 °C y e. 300 °C.

Debido al tratamiento térmico aplicado en los morteros poliméricos, se degrada la resina de poliéster, su contenido se disminuye en el mortero polimérico generando que los agregados finos se desprendan del mortero, ver Fig. 3.14, incluso se desprenden fragmentos de mortero.

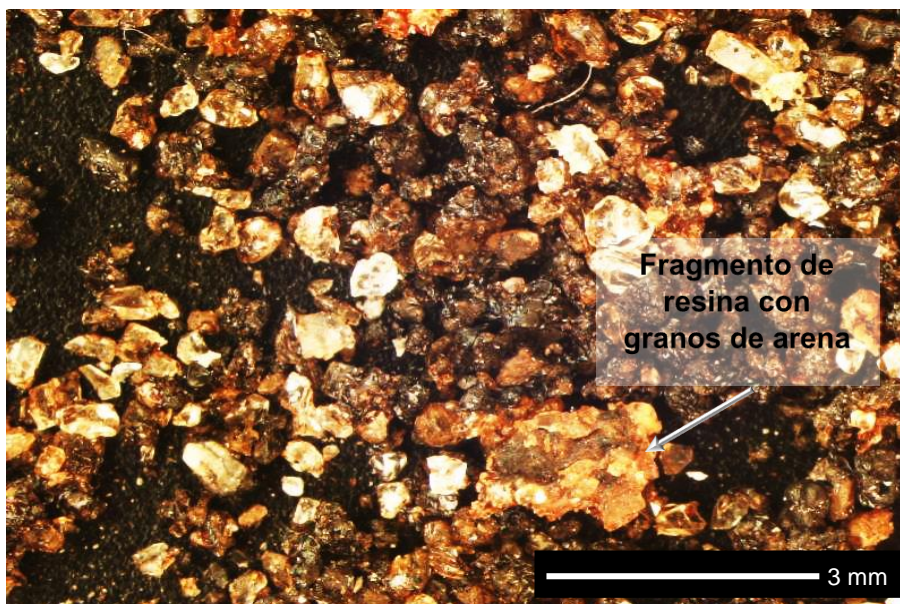


Figura 3.14. Aspecto de los granos de arena después de un desprendimiento en los morteros poliméricos.

Mediante el uso de microscopía electrónica de barrido con detector de electrones retrodispersados fue posible identificar los cambios en la matriz polimérica, debido que con este detector se generan imágenes con diferente brillantez en función de la composición química superficial. En la Fig. 3.15a se puede observar la matriz polimérica formada por la resina de poliéster insaturada con el agregado natural (arena sílica); los granos de arena están rodeados en su mayoría por la resina de poliéster, demostrando que se logró impregnar el agregado fino sin ningún problema con la relación peso 4:1 de resina/agregado.

Este mismo comportamiento se puede observar en los morteros que fueron sometidos a 40 °C y 100 °C, en los cuales no se presenta desprendimiento de agregados en la matriz (ver Fig. 3.15b y 3.15c). Por el contrario, al aumentar la temperatura de tratamiento (Fig. 3.15e) es evidente el cambio en la matriz polimérica, se puede observar como la resina empieza a empobrecerse en la matriz de los morteros poliméricos, provocando que la interfaz de la arena con la resina se debilite dejando expuestos los granos de arena. Debido a esto las propiedades mecánicas empiezan a decaer en los MP. En las Fig. 3.15d y 3.15e, el deterioro térmico de la matriz polimérica se hace más visible, a causa de esto, los granos de arena se

comienzan a desprender dejando cavidades en la matriz, además de la presencia de microfisuras en matriz, indicados por elipses de contorno azul.

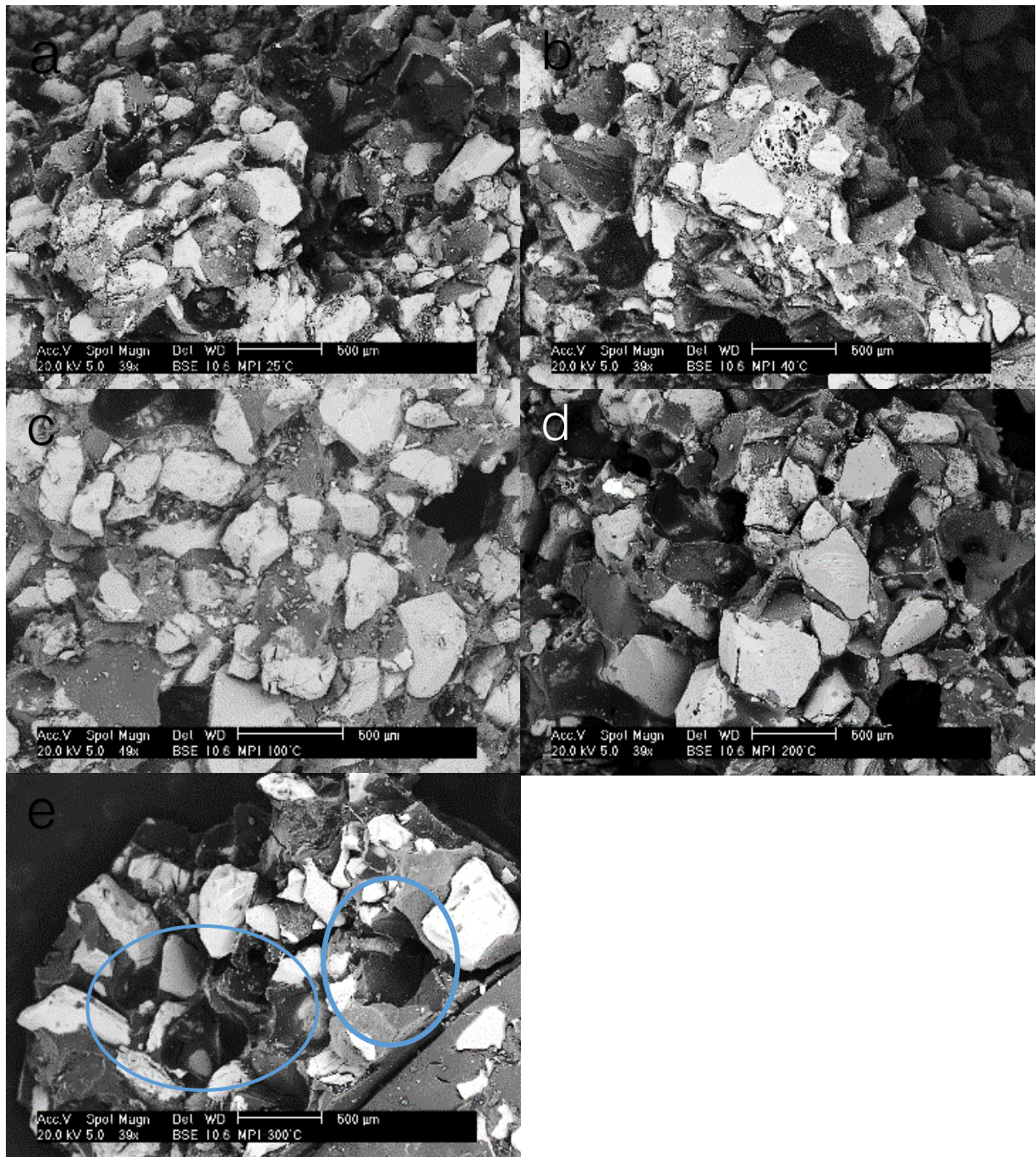


Figura 3.15. Micrografías de morteros poliméricos (MP1) a. Temperatura ambiente y después de un tratamiento a b. 40 °C, c. 100 °C, d. 200 °C y e. 300 °C.

En la Fig. 3.16 se presenta la interfaz entre la partícula de PET con el mortero (resina/arena) en las diferentes temperaturas de tratamiento.

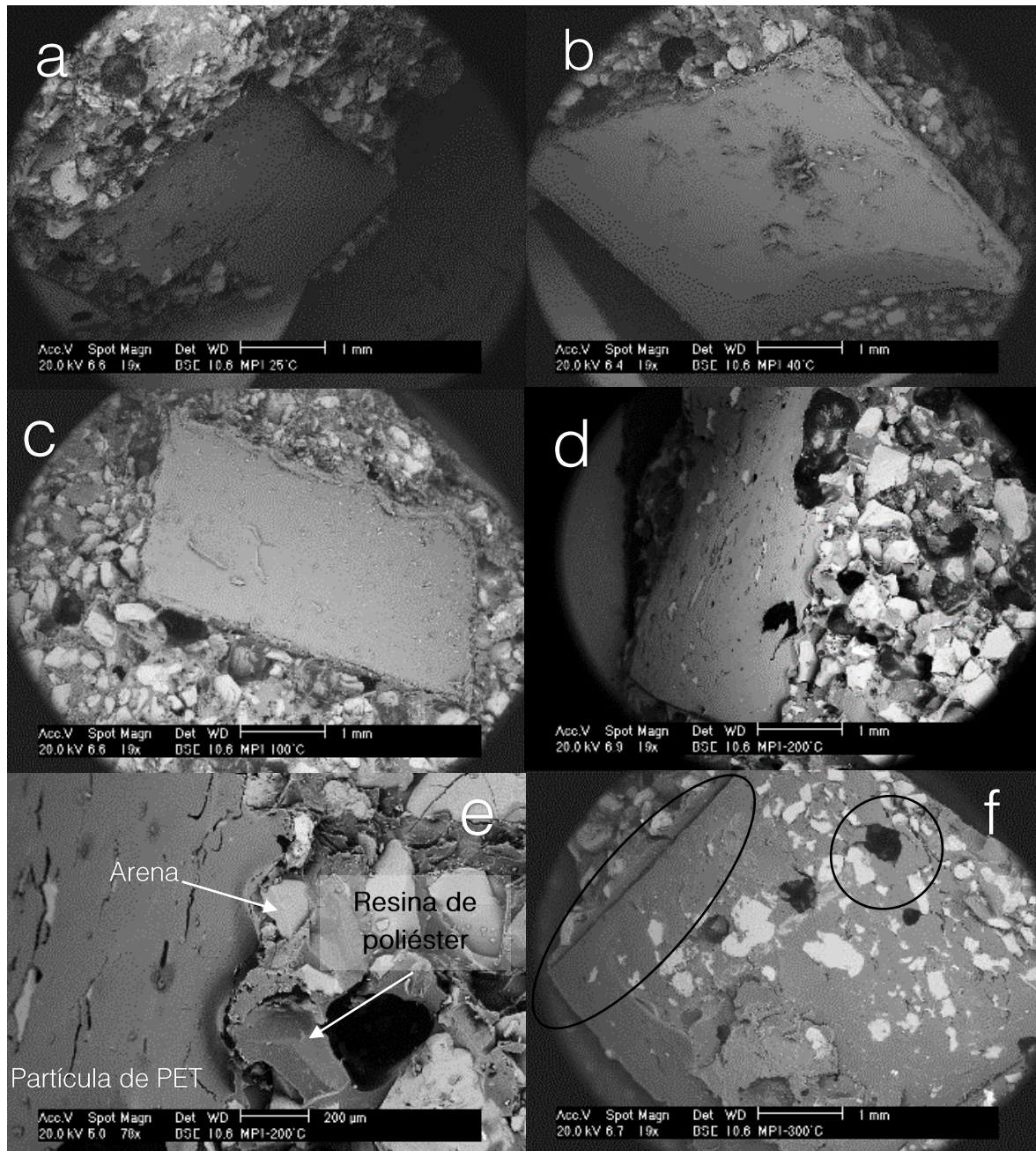


Figura 3.16. Micrografías de morteros poliméricos (MP1) a. Temperatura ambiente, después de un tratamiento a b. 40 °C, c. 100 °C, d. 200 °C, e. 200 °C y f. 300 °C.

La partícula de PET mantuvo su geometría a 25 °C, 40 °C y 100 °C (Fig.16 a-c), apreciándose claramente la adhesión de ésta con la matriz polimérica. Al sobrepasar la temperatura de 200 °C, la partícula de PET comienza a reblandecerse, adoptando el aspecto rugoso de la matriz; en la Fig. 3.16e se aprecia inclusive como los bordes adquieren la forma de los granos

de arena. A una temperatura de 300 °C, el PET se funde y se deforma, esto genera que sobresalga la matriz (Fig. 3.16f) apreciándose la presencia de granos de arena e inclusive los poros (círculo negro). Al observar la misma muestra mediante el detector de electrones secundarios (SE), (Fig. 3.17), se aprecia la partícula de PET con algunos indicios de deterioro en la superficie (zonas en óvalos negros), además pueden observarse algunos restos de resina polimérica (círculo blanco).

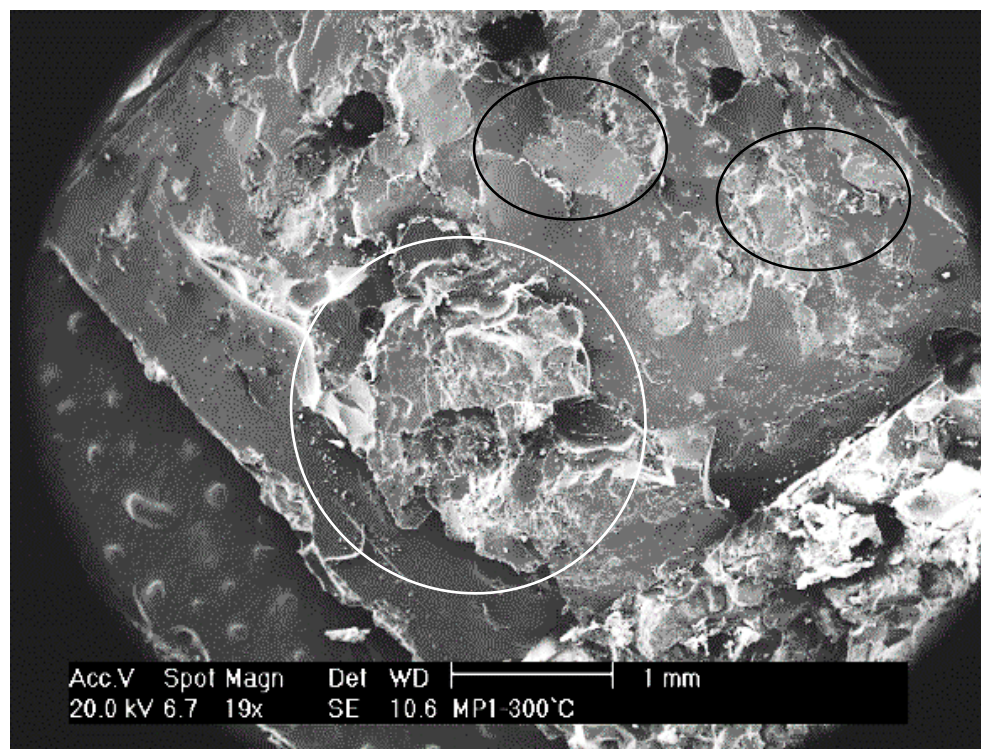


Figura 3.17. Micrografía de MP1 después de un tratamiento a 300 °C.

En la Fig. 3.16f se distingue una separación entre la partícula de PET y el mortero (óvalo negro), esta hendidura que se generó podría ser causado por los cambios volumétricos ocurridos en el PET; las partículas de PET modificaron su morfología después del tratamiento térmico.

En la Fig. 3.18 se muestran partículas de PET sin tratamiento y con tratamiento a 200 °C extraídas de los MP1. Se puede observar que las partículas de PET después del tratamiento térmico, se deformaron, esto debido al calentamiento; también se observan cambios en su coloración. Lo anterior, puede explicar la formación de la hendidura en la matriz polimérica, expuestos en la Fig. 3.16f.



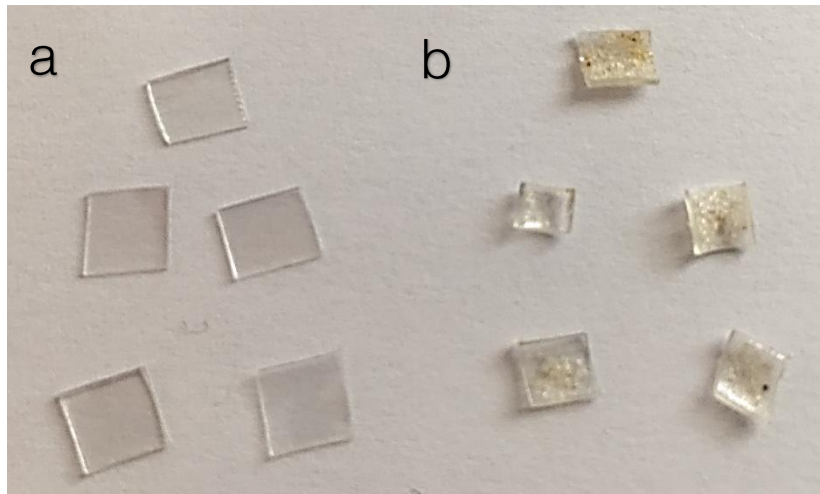


Figura 3.18. Partículas de PET, a. Sin y b. Con un tratamiento térmico a 200 °C durante 3 h.

En la Figura 3.19 se presenta el aspecto superficial del MP1 a 100 °C y 200 °C, mostrando hendiduras entre la interfaz matriz polimérica-partícula de PET. Estas hendiduras presentan dimensiones aproximadas entre 0.22 mm a 100 °C, mientras que a 200 °C tienen un tamaño entre 0.42 mm y 0.64 mm, estos espacios representan 4.4%, 8.4% y 12.8% respectivamente de la longitud de una partícula de 5 mm.

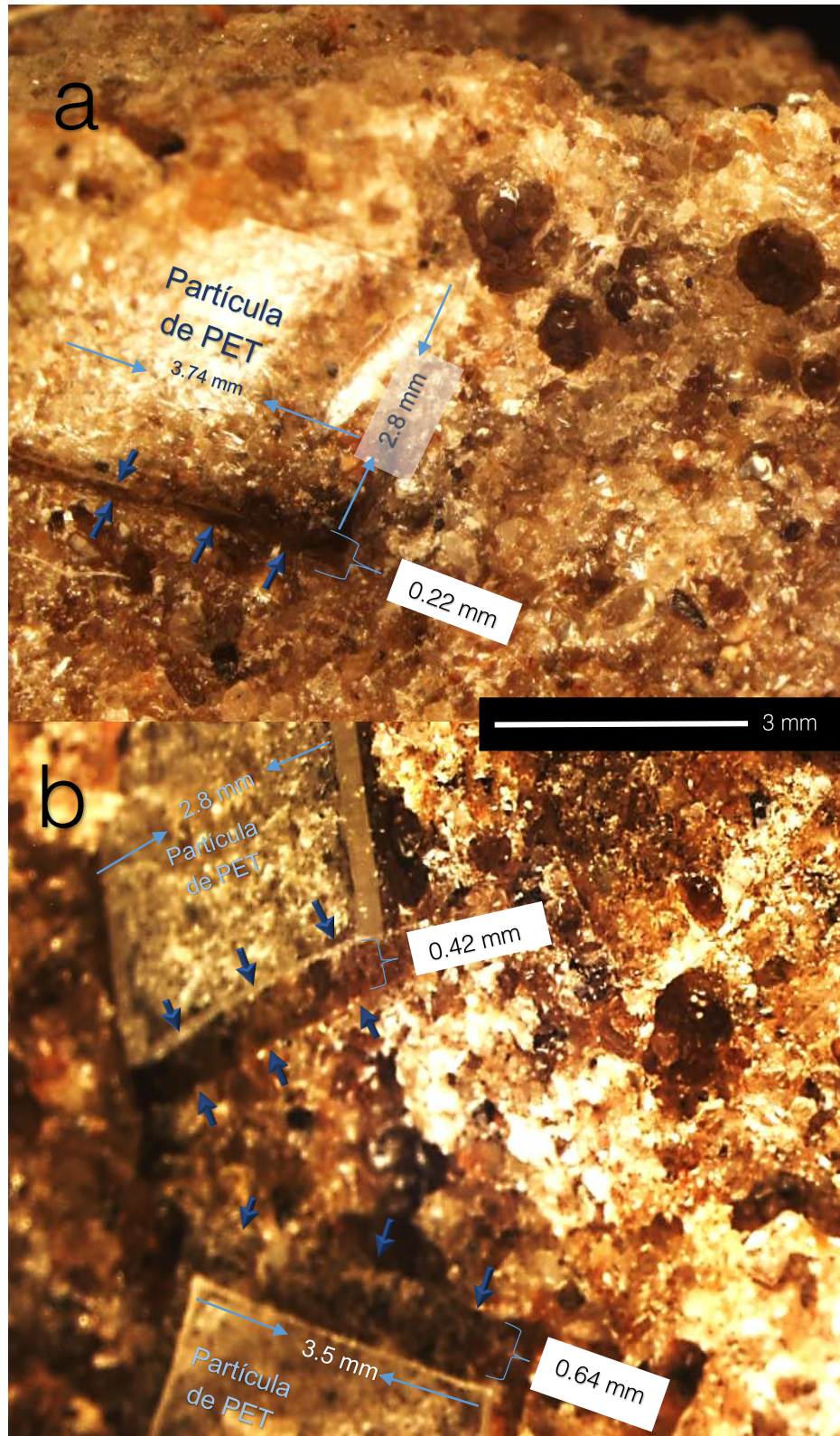


Figura 3.19. Micrografías de morteros poliméricos MPI, después de los tratamientos a.100 °C y b.200 °C.

Al analizar la superficie de los morteros se hace visible la generación de microfisuras en el material. En la Fig. 3.20a, en el MP1 a 25 °C se observan solo algunas imperfecciones (indicadas por las flechas) pero después de estar expuesto 3 horas a 300 °C (Fig. 3.20b), se puede notar que una serie de microfisuras aparecieron en el mortero, causadas por la descomposición de la resina, con tamaños entre 0.7 mm y 1.4 mm. Este deterioro en el material podría propiciar otro tipo de degradación, por ejemplo, Kicko-Walczak [101] menciona que estas microfisuras son indeseables en el mortero, ya que pueden ser responsables de la degradación ambiental del polímero y las consecuencias de la reducción del rendimiento mecánico, si el material se encuentra expuesto a una serie de soluciones agresivas o agua que permeé en el material como la humedad del medio ambiente.

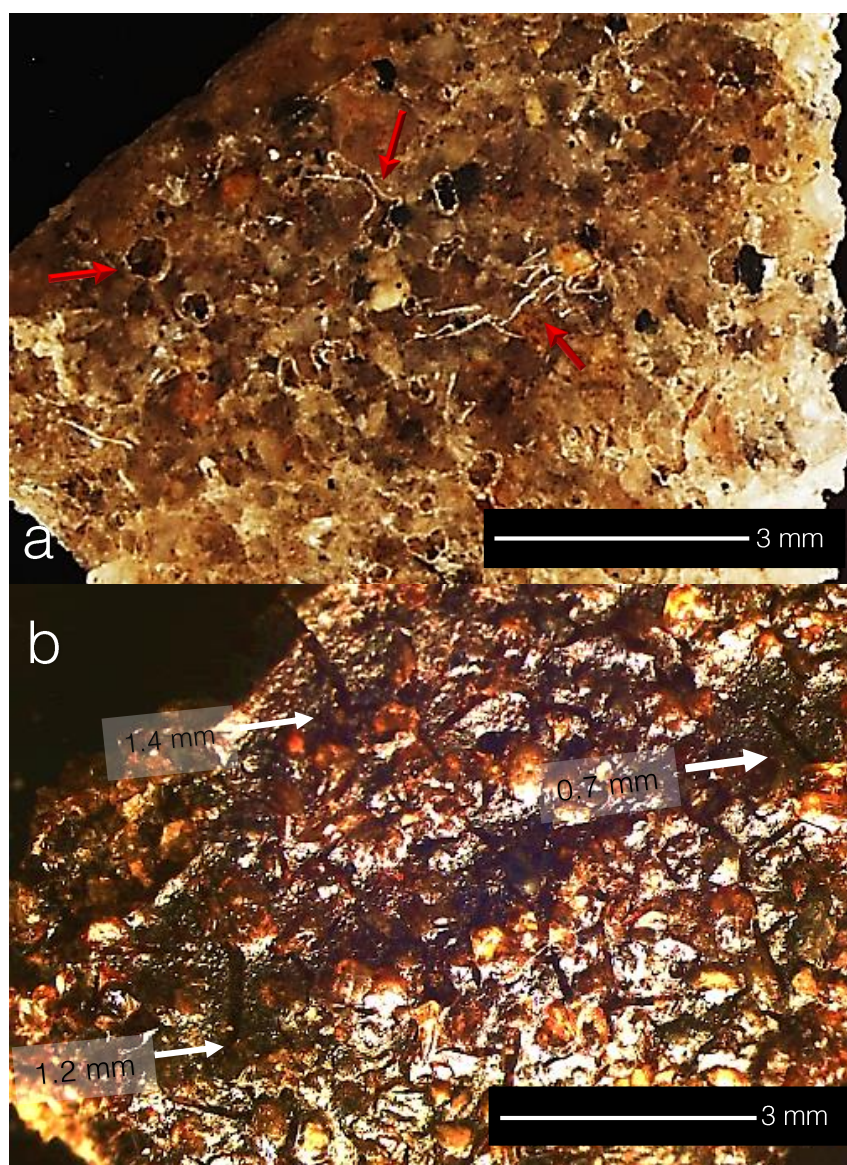


Figura 3.20. Micrografías de morteros poliméricos (MPI), a. Temperatura ambiente y b. Después de un tratamiento a 300 °C.

### 3.6.2. Evolución de la porosidad y densidad en los morteros poliméricos tratados térmicamente.

Todos los cambios mencionados con anterioridad modificaron la estructura de los morteros poliméricos y esto se hace evidente cuando se examina el cambio de la porosidad, es decir, la cantidad de porcentaje en volumen de poros permeables en el material. En la Tabla 3.11 se exponen los valores correspondientes para los morteros MP0 y MP1. Se denominará porosidad primaria a la cantidad de poros en los MP0 y MP1 antes del tratamiento térmico, es decir en los morteros de control, y porosidad secundaria a la que se desarrolló después de cada temperatura de calentamiento. Se presentó una disminución en la porosidad tanto de los MP0 y MP1 al ser tratados a 40°C, la porosidad primaria disminuyó un 46% para el MP0 y un 40% para el MP1, esto a causa del post-curado, con lo cual se obtiene un material más compacto, reflejándose en un aumento en la resistencia a la compresión. Este comportamiento se presentó de igual manera en los morteros tratados a 100 °C, en los MP0 el porcentaje en volumen de poros permeables se redujo un 51% con respecto a la porosidad primaria y para el MP1, en un 58% en relación con el mortero de control.

Tabla 3.11. Porcentaje en volumen de poros permeables y densidad en los morteros poliméricos después de un tratamiento térmico.

Temperatura (°C)	MP0				MP1			
	%	$\sigma$	$\rho(\text{g/cm}^3)$	$\sigma$	%	$\sigma$	$\rho(\text{g/cm}^3)$	$\sigma$
25	1.41	0.42	2.08	0.01	2.19	0.12	2.05	0.02
40	0.76	0.06	2.07	0.02	1.30	0.07	2.05	0.01
100	0.69	0.04	2.10	0.02	0.92	0.03	2.10	0.02
200	0.98	0.11	2.07	0.01	5.24	0.45	2.03	0.02
300	9.28	2.23	1.89	0.05	12.49	0.64	1.92	0.01

Sin embargo, al aumentar la temperatura de tratamiento, la porosidad se incrementó para ambas formulaciones, debido a los cambios físico y químicos ocurridos en los morteros. En el MP0 tratado a 200 °C, aunque la porosidad secundaria es aún menor en un 30% a la porosidad primaria, aumentó un 42% en relación al valor obtenido al MP0 tratado a 100 °C; esta temperatura cae en la primer etapa de la degradación térmica de las resinas de poliéster, posiblemente este aumento en la porosidad sea causado por una pérdida de agua por deshidratación [102].

En cuanto a la densidad, el valor para los MP0 de 25 °C a 200 °C, osciló entre 2.07-2.10 g/cm<sup>3</sup>, y para los MP1 entre 2.03-2.10 g/cm<sup>3</sup>, sin embargo, el cambio significativo se presentó a 300 °C para ambos morteros, reduciéndose hasta 1.89 g/cm<sup>3</sup> y 1.92 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente. Esto debido a la generación de grietas, las cuales, al aumentar el espacio vacío en el material, contribuyeron a que se perdiera la compactación de los morteros.

El mortero polimérico está conformado por la resina de poliéster insaturada y el PET, cada material cuenta con un coeficiente de expansión térmica diferente, en la Fig. 3.21 se muestran los coeficientes de expansión térmica de la resina de poliéster y del politereftalato de etileno [3, 11, 110]. En el MP1 tratado a 200 °C, se presentaron grietas provocadas por la diferencia del coeficiente de contracción térmica entre los dos materiales (PET-resina) después del tratamiento térmico, promoviendo un aumento en el volumen de espacios vacíos, ver Fig. 3.22a. Se puede inferir que el termoplástico se expande más en comparación del termoestable, esto debido al arreglo de sus cadenas poliméricas; en el termoplástico las cadenas lineales tienen más facilidad para moverse cuando se aplica calor, en comparación con el termoestable, el en cual las cadenas poliméricas con enlaces cruzados no son tan libres de deslizarse entre sí. Debido a la gran diferencia entre ambos coeficientes, se desarrollaron esfuerzos térmicos generando grietas en el material [11, 18].

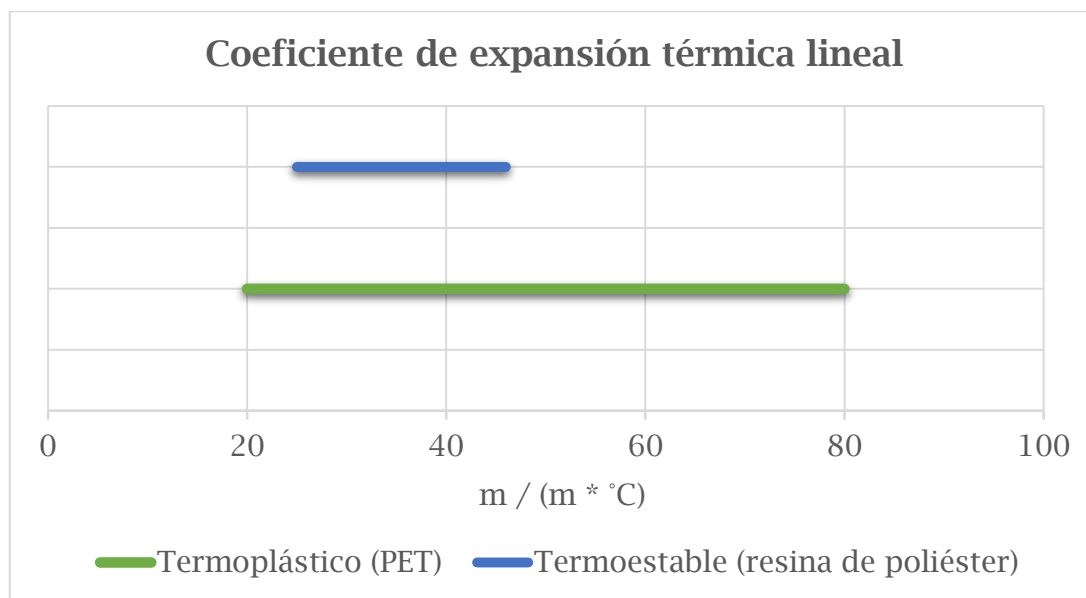


Figura 3.21. Coeficientes de expansión térmica de la resina de poliéster y PET.

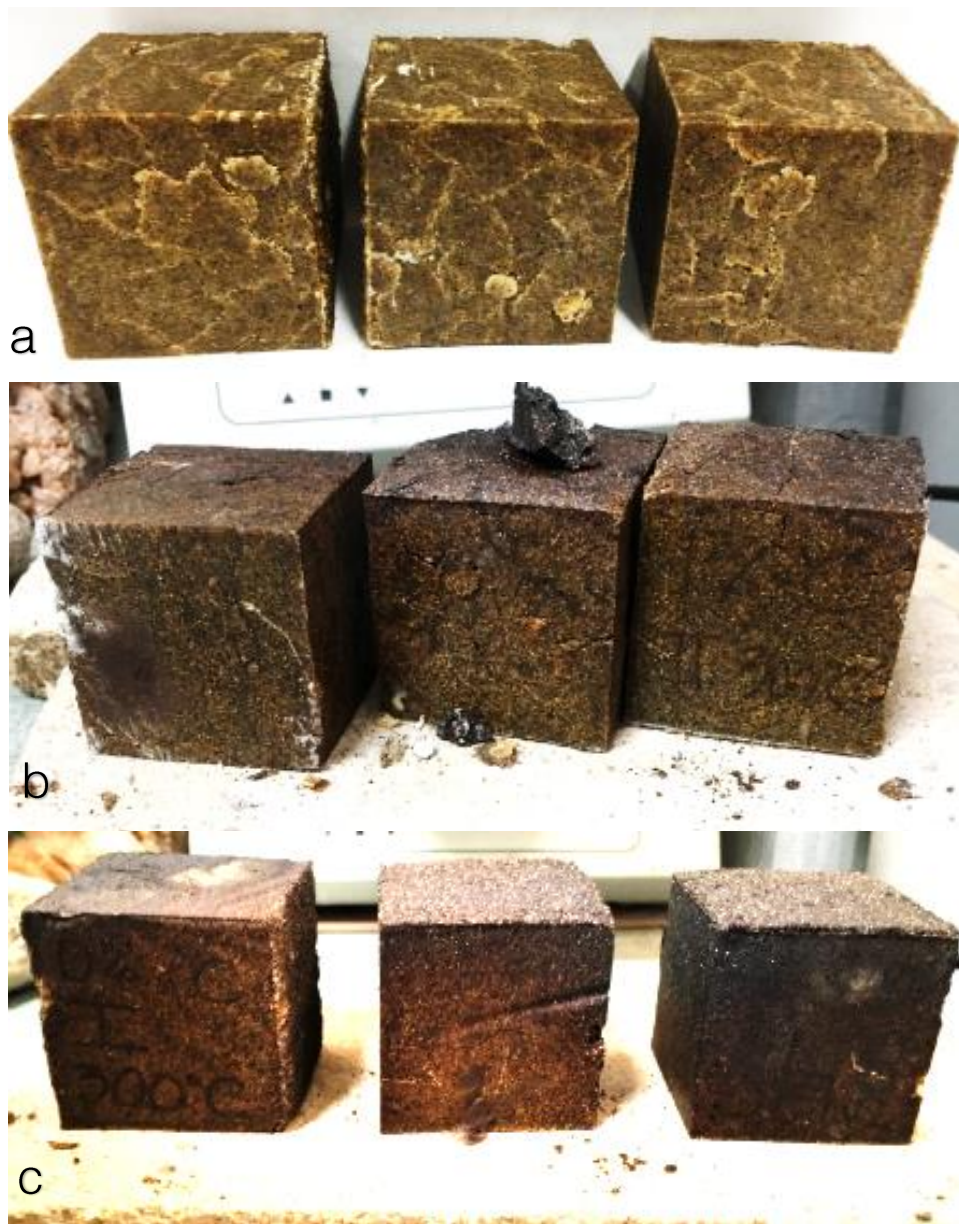


Figura 3.22. Morteros poliméricos después de un tratamiento a. MP1 a 200°C, b. MP1 a 300°C y c. MPO a 300 °C

Cuando los morteros MP1 son tratados a 200 °C, se alcanza la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) del PET [104], ver en Tabla 3.9, a esta temperatura la partícula de desecho se reblandece, pasando de un estado duro-rígido a un estado gomoso-flexible, provocando que se expanda la partícula; pero al ser la matriz más rígida, se crean esfuerzos térmicos, que al acumularse provocan la aparición de microfisuras y grietas, después del calentamiento [102].

En los morteros MP1 que fueron tratados a 100 °C, de igual manera se alcanza la  $T_g$  del PET, pero en estos morteros no se presentaron grietas después del calentamiento, posiblemente porque a 100 °C no se ha desarrollado completamente la resistencia máxima del mortero y es menos rígido que el MP1 a 200 °C.

La porosidad de los MP0 y MP1 a 300 °C se incrementó, para el MP0 en un 658% y para el MP1 en un 560%, ambos valores en comparación con el mortero de control correspondiente (Fig. 3.22c y Fig. 3.22b). A esta temperatura se podría asegurar que la descomposición de la resina ha comenzado, por lo consiguiente la generación de especies volátiles se hace presente en los morteros; al calentar un material compuesto a la temperatura de pirólisis de su matriz, su densidad disminuye debido a la generación intensiva de gas en la matriz [100], como se muestra en la Tabla 3.11, la cual disminuyó drásticamente a 300 °C para ambas formulaciones (MP0 y MP1). Estos productos volátiles se producen en mayor medida a temperaturas más altas provocando una disminución del peso molecular, originando mayor porosidad (agujeros) y esfuerzos térmicos en el morteros [14].

Es importante notar que cuando se someten los MP0 y MP1 a 300 °C su porcentaje en volumen de poros permeables se incrementa, pero en el caso del MP0 se acrecentó más en comparación que el MP1 ambos con respecto a su porosidad primaria. La temperatura de fusión del PET, es aproximadamente 240 °C, ver Tabla 3.9, sin duda al calentar los morteros a 300 °C se alcanza la temperatura de fusión, entonces a pesar de que los MP1 presentaron mayores incrementos en porosidad a 100 °C y 200 °C, el PET se fundió y al enfriar el mortero, las partículas actuaron como adherente entre el mortero, permitiendo que las grietas que se presentaron en el mortero se aminoraran, disminuyendo así la cantidad de poros generados en el material.

La formación de grietas y poros después del tratamiento térmico afecta la rigidez del mortero polimérico, por eso se presentó la disminución de la resistencia a la compresión.

### **3.7. Comparación de un MP frente a un MCP.**

El mortero base cemento Portland es el material más utilizado en la industria de la construcción desde hace más de 170 años [36], por esta razón es de interés una comparación de las propiedades físicas y mecánicas del mortero de cemento Portland con los morteros polímeros de resina de poliéster insaturada, además los morteros con partículas de desecho de PET (MP0 y MP1). Se evaluaron la resistencia a la flexión y a la compresión

en los MCP, de igual manera se midió el % en volumen de poros permeables y densidad ( $\rho$ ) de los MCP, todos los ensayos se realizaron a temperatura ambiente. En la Tabla 3.12 se muestran los resultados de las pruebas mecánicas.

Tabla 3.12. Comparativo de propiedades mecánicas de los MCP frente a morteros poliméricos.

Resistencia a la compresión		
Formulación	MPa	$\sigma$
MCP	20.50	0.70
MP0	66.15	1.19
MP1	72.63	2.34
Resistencia a la flexión		
Formulación	MPa	$\rho$
MCP	4.60	0.20
MP0	23.67	1.18
MP1	23.13	1.98

La resistencia a la compresión y flexión en morteros poliméricos es mayor que la resistencia de los morteros de cemento Portland. Éstas se elevan aproximadamente un 300% en resistencia a la compresión y 500% en resistencia la flexión, ambos valores con respecto a la resistencia de los MCP.

En cuanto a la comparación de las propiedades físicas de los MCP, MP0 y MP1 se presentan en la Tabla 3.13, el % en volumen de poros permeables y la densidad ( $\rho$ ).

Tabla 3.13. Comparativo de propiedades físicas de los MCP frente a morteros poliméricos.

Formulación	%	$\sigma$	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\sigma$
MCP	20.18	1.03	1.73	0.02
MP0	1.41	0.42	2.08	0.01
MP1	2.19	0.12	2.05	0.02

Los MCP cuentan con una mayor porosidad, aproximadamente 20 veces mayor que la densidad del MP1 y cerca de 10 veces la del MP0, es por esto que su densidad es menor en comparación con ambos morteros poliméricos, por la cantidad de poros presentes en el material, resultando en un material menos compacto.



Ya se ha demostrado que el uso de polímeros en la industria de la construcción mejora las propiedades del mortero y concreto polimérico (ver sección 1.2), los resultados aquí presentados corroboran esta información. Los morteros base cemento son una pésima opción cuando se requiere para aplicaciones donde el mortero está expuesto a soluciones agresivas, que puedan permear en el material y afectar su durabilidad, por ejemplo, recubrimientos de tuberías o cubiertas de contenedores de productos químicos, para lo cual los morteros poliméricos son los materiales idóneos por su baja permeabilidad (baja porosidad). Sin embargo, el mortero base cemento puede ser usado en otras aplicaciones donde la permeabilidad sea necesaria, por ejemplo, en pavimento en vialidades de bajo tráfico, áreas de estacionamientos y caminos para peatones y ciclistas, que permita filtrar el agua a través de él y evitar encharcamientos.

Es importante recalcar, que dependiendo de la aplicación y el medio donde se use el mortero, es el material que se debe elegir.

## Conclusiones

---

De acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio sobre el efecto de la temperatura en las propiedades físicas y mecánicas de los morteros poliméricos a los cuales se sustituyó arena sílica por partículas de desecho de PET, se puede concluir lo siguiente:

- Las partículas de desecho de PET pueden ser utilizadas eficazmente como sustituto de agregado mineral en la elaboración de morteros poliméricos. Adicionalmente sirven como refuerzo en el MP, debido a que se muestra un apreciable aumento en la resistencia a la compresión en los morteros poliméricos al emplear 1% y 2% de partículas de desecho de PET.
- Debido a la naturaleza similar entre la resina y las partículas de desecho, se obtuvo una buena unión entre ellas, lo cual también se ve reflejado en las propiedades mecánicas de los MP1.
- Al aumentar la cantidad de sustitución de agregado mineral por desecho de PET, aumenta la porosidad, debido a que éstas generan defectos en la estructura interna del mortero.
- A 100 °C los MP1 presentaron los mejores valores de resistencia a la compresión, las partículas de PET contribuyeron a este incremento en los morteros a esta temperatura.
- A 200 °C fue posible mejorar la resistencia a la compresión de los MP0, debido al proceso de post-curado llevado a cabo, el cual permite terminar la reticulación de la resina de poliéster insaturada.
- A 300 °C se obtuvieron los valores de resistencia a la compresión más bajos, esto debido a una degradación térmica en la resina de poliéster insaturada y a los cambios físicos en el PET; los cuales generaron la presencia de esfuerzos térmicos y aumento en la cantidad de poros.
- La resistencia a la flexión de los MP se vio afectada con los tratamientos térmicos a 100 °C y 200 °C debido a la rigidez alcanzada durante el post-curado.
- La mayor cantidad de poros y grietas en los morteros poliméricos dependen del tratamiento térmico aplicado, encontrando el mayor contenido a 300 °C.
- A pesar de la contracción de la resina de poliéster generada por la descomposición térmica, las partículas de PET permanecen adheridas a la matriz polimérica a todas las temperaturas tratamiento, esta unión se mejora con un tratamiento a 300 °C.

- El uso de desechos de PET es importante ya que ayuda a reducir la cantidad de agregado mineral empleado, además de un uso a largo plazo de residuos plásticos, disminuyendo la contaminación ambiental.
- Los morteros poliméricos mostraron un bajo porcentaje de volumen de poros permeables y mejores propiedades mecánicas en comparación con los morteros de cemento Portland. Siendo una mejor opción en aplicaciones donde se requiera alta resistencia y mínima permeabilidad.

## Referencias

---

- [1] L. Haurie, A.M. Lacasta, A. Ciudad, V. Realinho, J.I. Velasco, Addition of flame retardants in epoxy mortars: Thermal and mechanical characterization, *Constr. Build. Mater.* 42 (2013) 266–270. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.12.012.
- [2] ACI Committee 548, Guide for the Use of Polymers in Concrete, ACI 548.1R-97. (1997) 1–40.
- [3] R.K. Dhir, J.W. Green, Protection of concrete, in: E. & F.N. SPON, 2013: pp. 1689–1699. doi:10.1017/CBO9781107415324.004.
- [4] O. Elalaoui, E. Ghorbel, V. Mignot, M. Ben Ouezdou, Mechanical and physical properties of epoxy polymer concrete after exposure to temperatures up to 250 °C, *Constr. Build. Mater.* 27 (2012) 415–424. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.07.027.
- [5] J.M.L. dos Reis, Effect of temperature on the mechanical properties of polymer mortars, *Mater. Res.* 15 (2012) 645–649. doi:10.1590/S1516-14392012005000091.
- [6] R. Bedi, R. Chandra, S.P. Singh, Mechanical Properties of Polymer Concrete, *J. Compos. Mater.* 2013 (2013) 12.
- [7] J.S. Arrieta, E. Richaud, B. Fayolle, F. Nizeyimana, Thermal oxidation of vinyl ester and unsaturated polyester resins, *Polym. Degrad. Stab.* 129 (2016) 142–155. doi:10.1016/j.polymdegradstab.2016.04.003.
- [8] J.M. Miranda Vidales, L. Narvárez Hernández, J.I. Tapia López, E.E. Martínez Flores, L.S. Hernández, Polymer mortars prepared using a polymeric resin and particles obtained from waste pet bottle, *Constr. Build. Mater.* 65 (2014) 376–383. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.04.114.
- [9] E. Vipulanandan, C., Dharmaraj, N., Ching, Mechanical behaviour of polymer concrete systems, *Mater. Struct.* 21 (1988) 268–277.
- [10] F. Mahdi, A.A. Khan, H. Abbas, Physiochemical properties of polymer mortar composites using resins derived from post-consumer PET bottles, *Cem. Concr. Compos.* 29 (2007) 241–248. doi:10.1016/j.cemconcomp.2006.11.009.
- [11] M.C.S. Ribeiro, J.M.L. Reis, A.J.M. Ferreira, A.T. Marques, Thermal expansion of epoxy and polyester polymer mortars - Plain mortars and fibre-reinforced mortars, *Polym. Test.* 22 (2003) 849–857. doi:10.1016/S0142-9418(03)00021-7.
- [12] B. Yesilata, Y. Isiker, P. Turgut, Thermal insulation enhancement in concretes by adding waste PET and rubber pieces, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 1878–1882. doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.09.014.
- [13] M. Frigione, Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete, *Waste Manag.* 30 (2010) 1101–1106. doi:10.1016/j.wasman.2010.01.030.
- [14] C. Albano, N. Camacho, M. Hernández, A. Matheus, A. Gutiérrez, Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios, *Waste Manag.* 29 (2009) 2707–2716. doi:10.1016/j.wasman.2009.05.007.
- [15] L. Gu, T. Ozbakkaloglu, Use of recycled plastics in concrete: A critical review, *Waste Manag.* 51 (2016) 19–42. doi:10.1016/j.wasman.2016.03.005.

- [16] M. Heidari-Rarani, M.R.M. Aliha, M.M. Shokrieh, M.R. Ayatollahi, Mechanical durability of an optimized polymer concrete under various thermal cyclic loadings - An experimental study, *Constr. Build. Mater.* 64 (2014) 308–315. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.04.031.
- [17] F. Awaja, S. Zhang, M. Tripathi, A. Nikiforov, N. Pugno, Cracks, microcracks and fracture in polymer structures: Formation, detection, autonomic repair, *Prog. Mater. Sci.* 83 (2016) 536–573. doi:10.1016/j.pmatsci.2016.07.007.
- [18] D.L. Hiemstra, N.R. Sottos, Thermally Induced Interfacial Microcracking in Polymer Matrix Composites, *J. Compos. Mater.* 27 (1993) 1030–1051. doi:10.1177/002199839302701005.
- [19] C.L. Beyler, M.M. Hirschler, Thermal Decomposition of Polymers, in: *SFPE Handb. Fire Prot. Eng.* 2, 4th ed., NFPA, 2002: pp. 110–131. doi:10.1021/cm200949v.
- [20] M.C.S. Ribeiro, P.R. Nóvoa, A.J.M. Ferreira, A.T. Marques, Flexural performance of polyester and epoxy polymer mortars under severe thermal conditions, *Cem. Concr. Compos.* 26 (2004) 803–809. doi:10.1016/S0958-9465(03)00162-8.
- [21] M.M. El-Hawary, H. Abdel-Fattah, Temperature effect on the mechanical behavior of resin concrete, *Constr. Build. Mater.* 14 (2000) 317–323. doi:10.1016/S0950-0618(00)00032-5.
- [22] C.Z. K.-F. Arndt, S. Jipa, F. Krahl, G. Steiner, T. Zaharescu, *Polymer Solids and Polymer Melts – Definitions and Physical Properties I*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 3, 2013. doi:10.1007/978-3-642-32072-9.
- [23] Polimerización | Tecnología de los Plásticos, (n.d.). <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.mx/2013/07/polimerizacion.html> (accessed November 17, 2017).
- [24] R.J. Young, P.A. Lovell, *Introduction to Polymers*, 3rd ed., Taylor & Francis, 2011. <https://books.google.com.mx/books?id=lmQg2MK8NtkC>.
- [25] F.W. Billmeyer, *Ciencia de los polímeros*, Reimpresió, Reverté, 1975. <https://books.google.com.mx/books?id=vL9QrpOKsQcC>.
- [26] M.F. Ashby, D.R.H. Jones, *Engineering Materials 2 An Introduction to Microstructures, Processing and Design*, Third Edit, Elsevier, 2006.
- [27] D.R. Askeland, P.P. Phulé, *Ciencia e ingeniería de los materiales*, (2004) 669–721.
- [28] A. Ravve, *Principles of Polymer Chemistry*, 3rd ed., Springer-Verlag New York Inc., 2012. doi:https://doi.org/10.1007/978-1-4614-2212-9.
- [29] X. Ramis Juan, *Estudio de la eficiencia de sistemas químicos de iniciación del curado de resinas de poliéster insaturado*, Universitat Politècnica de Catalunya, 1993. <http://www.tdx.cat/handle/10803/6686> (accessed July 5, 2017).
- [30] The Open University, *Introduction to polymers*, Open Learn. (2016) 128. <http://www.open.edu/openlearn/science-maths-technology/science/chemistry/introduction-polymers/content-section-0?intro=1>.
- [31] J.W. Gooch, Elastomer, in: J.W. Gooch (Ed.), *Encycl. Dict. Polym.*, Springer New York, New York, NY, 2007: pp. 344–345. doi:10.1007/978-0-387-30160-0\_4202.
- [32] J.W. Gooch, Binder, in: J.W. Gooch (Ed.), *Encycl. Dict. Polym.*, Springer New York, New York, NY, 2007: p. 107. doi:10.1007/978-0-387-30160-0\_1267.

- [33] B.H. Segundo, I.U. Joaquín, *Introducción al conocimiento de materiales*, UNED, 2014. <https://books.google.com.mx/books?id=OabsAgAAQBAJ>.
- [34] D.D. Woodson, *Concrete Portable Handbook*, 1st Editio, Elsevier, 2012. doi:10.1016/C2009-0-64403-2.
- [35] ACI Committee 548, *Polymer-Modified Concrete*, ACI 548.3R-03. (2003) 1–40.
- [36] Y. Ohama, *Handbook of polymer-modified concrete and mortars Properties and Process Technology*, 1st Editio, Noyes Publications, United States of America, 1995.
- [37] D.W. Fowler, *Polymers in concrete : a vision for the 21st century*, *Cem. Concr. Compos.* 21 (1999) 449–452.
- [38] L.M. Vélez, *Permeabilidad y Porosidad en Concreto*, *Rev. Tecno Lógicas.* (2010) 169–187. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5062984&info=resumen&idioma=SPA>.
- [39] N.H. Nur, M.W. Hussin, M. Ismail, M. A. Ismail, A. Mohamed, N.F. Ariffin, N.H. Abdul Shukur Lim, M. Samadi, *Effect of post-curing regime on density, compressive strength and crosslinking of polymer concrete*, *J. Teknol.* 77 (2015) 31–35. doi:10.11113/jt.v77.6305.
- [40] C. Gálan Marín, *Caracterización de un Mortero Polimérico con resina de poliéster insaturado y árido de albero para su aplicación en construcción*, Universidad de Sevilla, 2001. [http://encore.fama.us.es/iii/encore/record/C\\_\\_Rb1519994\\_\\_Sgalan-marin\\_\\_P0,4\\_\\_Orightresult\\_\\_U\\_\\_X4?lang=spi&suite=cobalt](http://encore.fama.us.es/iii/encore/record/C__Rb1519994__Sgalan-marin__P0,4__Orightresult__U__X4?lang=spi&suite=cobalt).
- [41] M. Worzakowska, *Thermal and dynamic mechanical properties of IPNS formed from unsaturated polyester resin and epoxy polyester*, *J. Mater. Sci.* 44 (2009) 4069–4077. doi:10.1007/s10853-009-3587-4.
- [42] L. Ying, B. Yu, X. Jin, L. Song, Y. Hu, *Study on thermal degradation and combustion behavior of flame retardant unsaturated polyester resin modified with a reactive phosphorus containig monomer*, *RSC Adv.* 6 (2016) 49633–49642. doi:10.1039/C6RA06544A.
- [43] P. Penczek, P. Czub, J. Pielichowski, *Unsaturated Polyester Resins: Chemistry and Technology*, *Adv. Polym. Sci.* 184 (2005) 1–95. doi:<https://doi.org/10.1007/b136215>.
- [44] K.S. Rebeiz, *Time-Temperature Properties of Polymer Concrete Using Recycled PET*, *Cem. Concr. Compos.* 17 (1994) 119–124.
- [45] N.R. Paluvai, S. Mohanty, S.K. Nayak, *Studies on thermal degradation and flame retardant behavior of the sisal fiber reinforced unsaturated polyester toughened epoxy nanocomposites*, *J. Appl. Polym. Sci.* 132 (2015) 15–17. doi:10.1002/app.42068.
- [46] M. Martínez-López, G. Martínez-Barrera, C. Barrera-Díaz, F. Ureña-Núñez, J.M.L. Dos Reis, *Waste Tetra Pak particles from beverage containers as reinforcements in polymer mortar: Effect of gamma irradiation as an interfacial coupling factor*, *Constr. Build. Mater.* 121 (2016) 1–8. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.05.153.
- [47] S. Aslan, B. Immirzi, P. Laurencio, M. Malinconiso, E. Martuscelli, M.G. Volpe, M. Pelino, L. Savini, *Unsaturated Polyester Resins from Glycolysed Waste Polyethyleneterephthalate. Synthesis and Comparison of Properties and Performance with Virgin Resin*, *J. Mater. Sci.* 32 (1997) 2329–2336. doi:10.1023/a:1018584519173.
- [48] M.I. Ul Haq, *Applications of unsaturated polyester resins*, *Russ. J. Appl. Chem.* 80 (2007) 1256–1269. doi:10.1134/S1070427207070464.

- [49] S.J. Evans, P.J. Haines, G.A. Skinner, The thermal degradation of polyester resins II. The effects of cure and of fillers on degradation, *Thermochim. Acta.* 291 (1997) 43–49. doi:10.1016/S0040-6031(96)03102-4.
- [50] M.T. Albdiry, B.F. Yousif, H. Ku, Fracture toughness and toughening mechanisms of unsaturated polyester-based clay nanocomposites, *13th Int. Conf. Fract.* (2013) 1–10.
- [51] F. Carrión, L. Montalbán, J.I. Real, T. Real, Mechanical and Physical Properties of Polyester Polymer Concrete Using Recycled Aggregates from Concrete Sleepers, 2014 (2014). doi:10.1155/2014/526346.
- [52] ASTM International - Colocando los residuos en su lugar, (n.d.). [https://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/SPJA17/bassett\\_spja17.html](https://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/SPJA17/bassett_spja17.html) (accessed November 19, 2017).
- [53] R. Siddique, J. Khatib, I. Kaur, Use of recycled plastic in concrete: A review, *Waste Manag.* 28 (2008) 1835–1852. doi:10.1016/j.wasman.2007.09.011.
- [54] J.M.L. Reis, E.P. Carneiro, Evaluation of PET waste aggregates in polymer mortars, *Constr. Build. Mater.* 27 (2012) 107–111. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.08.020.
- [55] Z. Ge, D. Huang, R. Sun, Z. Gao, Properties of plastic mortar made with recycled polyethylene terephthalate, *Constr. Build. Mater.* 73 (2014) 682–687. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.10.005.
- [56] S.C. Kou, G. Lee, C.S. Poon, W.L. Lai, Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes, *Waste Manag.* 29 (2009) 621–628. doi:10.1016/j.wasman.2008.06.014.
- [57] D.E. Ramírez-Arreola, C. Sedano-de la Rosa, N.B. Haro-Mares, J.A. Ramírez-Morán, A.A. Pérez-Fonseca, J.R. Robledo-Ortíz, Compressive strength study of cement mortars lightened with foamed HDPE nanocomposites, 74 (2015) 119–124. doi:10.1016/j.matdes.2015.02.013.
- [58] T.R. Naik, S.S. Singh, C.O. Huber, B.S. Brodersen, Use of post-consumer waste plastics in cement-based composites, *Cem. Concr. Res.* 26 (1996) 1489–1492. doi:10.1016/0008-8846(96)00135-4.
- [59] P. Panyakapo, M. Panyakapo, Reuse of thermosetting plastic waste for lightweight concrete, *Waste Manag.* 28 (2008) 1581–1588. doi:10.1016/j.wasman.2007.08.006.
- [60] A. Aattache, R. Soltani, A. Mahi, Investigations for properties improvement of recycled PE polymer particles-reinforced mortars for repair practice, *Constr. Build. Mater.* 146 (2017) 603–614. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.04.110.
- [61] N. Usahanunth, S. Tuprakay, The transformation of waste Bakelite to replace natural fine aggregate in cement mortar, *Case Stud. Constr. Mater.* 6 (2017) 120–133. doi:10.1016/j.cscm.2017.01.005.
- [62] A. Kan, R. Demirboğa, A novel material for lightweight concrete production, *Cem. Concr. Compos.* 31 (2009) 489–495. doi:10.1016/j.cemconcomp.2009.05.002.
- [63] A. Kan, R. Demirboğa, A new technique of processing for waste-expanded polystyrene foams as aggregates, *J. Mater. Process. Technol.* 209 (2009) 2994–3000. doi:10.1016/j.jmatprotec.2008.07.017.
- [64] A.C. Corredor-Bedoya, R.A. Zoppi, A.L. Serpa, Composites of scrap tire rubber particles and

- adhesive mortar – Noise insulation potential, *Cem. Concr. Compos.* 82 (2017) 45–66. doi:10.1016/j.cemconcomp.2017.05.007.
- [65] M.C. Bignozzi, A. Saccani, F. Sandrolini, New polymer mortars containing polymeric wastes. Part 2. Dynamic mechanical and dielectric behaviour, *Compos. - Part A Appl. Sci. Manuf.* 33 (2002) 205–211. doi:10.1016/S1359-835X(01)00093-8.
- [66] S.P.B. Sousa, M.C.S. Ribeiro, E.M. Cruz, G.M. Barrera, A.J.M. Ferreira, Mechanical behaviour analysis of polyester polymer mortars reinforced with tire rubber fibres, *Ciência Tecnol. Dos Mater.* 29 (2017) e162–e166. doi:10.1016/j.ctmat.2016.07.009.
- [67] K. Hannawi, S. Kamali-Bernard, W. Prince, Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates, *Waste Manag.* 30 (2010) 2312–2320. doi:10.1016/j.wasman.2010.03.028.
- [68] P. Mounanga, W. Gbongbon, P. Poullain, P. Turcry, Proportioning and characterization of lightweight concrete mixtures made with rigid polyurethane foam wastes, *Cem. Concr. Compos.* 30 (2008) 806–814. doi:10.1016/j.cemconcomp.2008.06.007.
- [69] K.R. Akça, Ö. Çakır, M. İpek, Properties of polypropylene fiber reinforced concrete using recycled aggregates, *Constr. Build. Mater.* 98 (2015) 620–630. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.08.133.
- [70] S.R. Shukla, K.S. Kulkarni, Depolymerization of poly(ethylene terephthalate) waste, *J. Appl. Polym. Sci.* 85 (2002) 1765–1770. doi:10.1002/app.10714.
- [71] S. Venkatachalam, S. Nayak, J. Labde, Degradation and Recyclability of Poly (Ethylene Terephthalate), in: *Polyester, 2012*: pp. 75–98. doi:10.5772/48612.
- [72] J.B. Martínez Barrera, Gonzalo Hernández Zaragoza, T. López Lara, C. Menchaca Campos, *Materiales sustentables y reciclados en la construcción*, *OmniaScience.* (2015) 147. <https://books.google.com.mx/books?id=Jl4wBwAAQBAJ&pg=PA105&lpg=PA105&dq=reciclaje+quimico+del+pet+hidrolisis+presion&source=bl&ots=Y9GUAB4fvT&sig=8MpOIVUw4WAKyaM5HHPQkFsBS8&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwj5-eKB66vYAhUrwVQKHTSTAPk4ChDoAQhFMAY#v=onepage&q&f=false> (accessed December 27, 2017).
- [73] B.-W. Jo, S.-K. Park, J.-C. Park, Mechanical properties of polymer concrete made with recycled PET and recycled concrete aggregates, *Constr. Build. Mater.* 22 (2008) 2281–2291. doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.10.009.
- [74] M. San Andres, R. Chercoles, J.M.. De la Roja, M. Gómez, Factores responsables de la degradación química de los polímeros . Efectos provocados por la radiación lumínica sobre algunos materiales utilizados en conservación : primeros resultados, *Factores Responsab. La Restauración. España.* (2010) 263–304.
- [75] J.W. Gooch, ed., *Oligomer*, in: *Encycl. Dict. Polym.*, Springer New York, New York, NY, 2007: p. 676. doi:10.1007/978-0-387-30160-0\_8041.
- [76] V. Kholodovych, W. Welsh, Thermal-Oxidative Stability and Degradation of Polymers, *Phys. Prop. Polym. Handb. SE - 54.* (2007) 927–938. doi:10.1007/978-0-387-69002-5\_54.
- [77] *Depolymerization*, (n.d.). <http://polymerdatabase.com/polymerchemistry/Depolymerization.html> (accessed November 20, 2017).



- [78] CDSolutions, Degradation Mechanisms - Random Scission, (2003). [http://www.ingenieria-analitica.com/LlocIA1/PDF/CDS/Aplicacions/13\\_RANDOMSCISSION.pdf](http://www.ingenieria-analitica.com/LlocIA1/PDF/CDS/Aplicacions/13_RANDOMSCISSION.pdf).
- [79] D.D.E.E. Profesionales, Realizado con la asesoría de Prof. Marco A. Sabino. Prof. Mireya Matos., (2008).
- [80] NMX-C-414-ONNCCE-2004 "INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-CEMENTOS HIDRÁULICOS-ESPECIFICACIONES Y MÉTODOS DE PRUEBA," (2004). <https://es.scribd.com/doc/55788691/NMX-C-414-ONNCCE-2004> (accessed October 31, 2017).
- [81] A. International, ASTM C 778, 2002, Standard Specification for Standard Sand, 7 (2006) 7–10.
- [82] A. International, ASTM C94 / C94M, 2003, Standard Specification for Ready-Mixed Concrete, (2003).
- [83] A. International, ASTM C109 / C109M, 2006, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), (2016).
- [84] A. International, ASTM C 642, 2006, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, (2006) 8–10. doi:10.1520/C0642-13.5.
- [85] A. International, ASTM C 348, 2002, Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars, Current. 4 (2002).
- [86] B.H. Stuart, Introduction, in: *Infrared Spectrosc. Fundam. Appl.*, John Wiley & Sons, Ltd, 2004: pp. 1–13. doi:10.1002/0470011149.ch1.
- [87] J.W. Gooch, ed., Semicrystalline, in: *Encycl. Dict. Polym.*, Springer New York, New York, NY, 2007: p. 870. doi:10.1007/978-0-387-30160-0\_10260.
- [88] Polímeros cristalinos y amorfos | Textos Científicos, (n.d.). <https://www.textoscientificos.com/polimeros/estructura> (accessed October 30, 2017).
- [89] Difracción de rayos X. Introducción, (n.d.). [https://www.upct.es/~minaees/difraccion\\_rayosx.pdf](https://www.upct.es/~minaees/difraccion_rayosx.pdf) (accessed November 20, 2017).
- [90] C. Ferrer Giménez, V. Amigó Borrás, *Tecnología de materiales*, Universidad Politécnica de València, 2003. <http://propiedadesmaterialesdeconstruccion.blogspot.mx/2013/04/propiedades-mecanicas-de-los-materiales.html> (accessed October 30, 2017).
- [91] S.J. Evans, P.J. Haines, G.A. Skinner, The effects of structure on the thermal degradation of polyester resins, *Thermochim. Acta.* 278 (1996) 77–89. doi:10.1016/0040-6031(95)02851-X.
- [92] J.M.L. Reis, R. Chianelli-Junior, J.L. Cardoso, F.J.V. Marinho, Effect of recycled PET in the fracture mechanics of polymer mortar, *Constr. Build. Mater.* 25 (2011) 2799–2804. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.12.056.
- [93] D.S. Kumar, M.J. Shukla, K.K. Mahato, D.K. Rathore, R.K. Prusty, B.C. Ray, Effect of post-curing on thermal and mechanical behavior of GFRP composites, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 75 (2015) 12012. doi:10.1088/1757-899X/75/1/012012.
- [94] R.B. Patel, K.S. Patel, R.N. Patel, K.D. Patel, Thermal and mechanical properties of modified polyester resin and jute composite, *Der Chem. Sin.* 5 (2014) 47–54.
- [95] X. Ramis, J.M. Salla, Time-temperature transformation (TTT) cure diagram of an unsaturated

- polyester resin, *J. Polym. Sci. Part B Polym. Phys.* 35 (1997) 371–388. doi:10.1002/(SICI)1099-0488(19970130)35:2<371::AID-POLB13>3.3.CO;2-6.
- [96] J.L. Martín, Kinetic analysis of an asymmetrical DSC peak in the curing of an unsaturated polyester resin catalysed with MEKP and cobalt octoate, *Polymer (Guildf)*. 40 (1999) 3451–3462. doi:10.1016/S0032-3861(98)00556-4.
- [97] B. Jeyaprabha, G. Elangovan, P. Prakash, Effects of elevated temperature and water quenching on strength and microstructure of mortars with river sand substitutes, *Constr. Build. Mater.* 114 (2016) 688–698. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.03.189.
- [98] Y.I. Dimitrienko, Thermomechanical behaviour of composite materials and structures under high temperatures: 2. Structures, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 28 (1997) 463–471. doi:10.1016/S1359-835X(96)00145-5.
- [99] E. Braun, B.C. Levin, Polyesters: A Review of the Literature on Products of Combustion and Toxicity, *Fire Mater.* 10 (1986) 107–123.
- [100] Y.I. Dimitrienko, Thermomechanical behaviour of composite materials and structures under high temperatures: 1. Materials, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 28 (1997) 453–461. doi:10.1016/S1359-835X(96)00144-3.
- [101] E. Kicko-Walczak, Studies on the Mechanism of Thermal Decomposition of Unsaturated Polyester Resins with Reduced Flammability, *Polym. Polym. Compos.* 12 (2004) 127–134.
- [102] E. Kandare, B.K. Kandola, D. Price, S. Nazaré, R.A. Horrocks, Study of the thermal decomposition of flame-retarded unsaturated polyester resins by thermogravimetric analysis and Py-GC/MS, *Polym. Degrad. Stab.* 93 (2008) 1996–2006. doi:10.1016/j.polymdegradstab.2008.03.032.
- [103] N. Dimitrov, L. Kratofil Krehula, A. Ptiček Siročić, Z. Hrnjak-Murgić, Analysis of recycled PET bottles products by pyrolysis-gas chromatography, *Polym. Degrad. Stab.* 98 (2013) 972–979. doi:10.1016/j.polymdegradstab.2013.02.013.
- [104] A.E. Wiacek, M. Jurak, A. Gozdecka, M. Worzakowska, Interfacial properties of PET and PET / starch polymers developed by air plasma processing, *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.* 532 (2017) 323–331. doi:10.1016/j.colsurfa.2017.04.074.
- [105] K. Sethuraman, T. Lakshmikandhan, M. Alagar, Surface free energy and dielectric properties of vinyltriethoxysilane functionalized SBA-15 reinforced unsaturated polyester nanocomposites, *Polym. Compos.* (2015) n/a-n/a. doi:10.1002/pc.23543.
- [106] E.A. Campo, *Selection of Polymeric Materials: How to Select Design Properties from Different Standards*, Elsevier Science, 2008. [https://books.google.com.mx/books?id=gBIJN\\_vhPQ4C](https://books.google.com.mx/books?id=gBIJN_vhPQ4C).
- [107] B. Dholakiya, *Unsaturated Polyester Resin for Specialty Applications*, in: *Polyester*, INTECH Open Access Publisher, 2012: pp. 167–202. doi:http://dx.doi.org/10.5772/48479.
- [108] C. Zhang, S. Mei, L. Jian, Q. Zhao, Synthesis and properties of a modified unsaturated polyester resin with phosphorus-containing pendant groups, *Polym. Bull.* 70 (2013) 1097–1111. doi:10.1007/s00289-012-0889-5.
- [109] S. Wu, *Polymer Interface and Adhesion*, CRC Press, 1982. <https://books.google.com.mx/books?id=tXNgrCbsCfIC>.
- [110] Coeficiente de expansión térmica lineal del PET, (n.d.). <http://www.plasticos->

[mecanizables.com/plasticos\\_Politereftalato\\_PET.html](http://mecanizables.com/plasticos_Politereftalato_PET.html) (accessed December 26, 2017).