



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

UNIDAD ACADÉMICA PROFESIONAL TIANGUISTENCO

**“Reciclaje mecánico y por radiación gamma de envases de Tetra Pak
Brik Aseptic® para la modificación de propiedades físicas y mecánicas
y su reuso como sustituto de agregado fino en concreto”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO EN PLÁSTICOS

P R E S E N T A

JESICA JAZMIN NIEVES FLORES

DIRECTOR: M. en C. A. LILIANA IVETTE ÁVILA CÓRDOBA

ASESOR: Dr. GONZALO MARTÍNEZ BARRERA

TIANGUISTENCO, MÉX. ENERO 2015.

DEDICATORIA

Con todo mi cariño y mi amor para las personas que hicieron todo en la vida para que yo pudiera lograr mis sueños, por motivarme y darme la mano cuando sentía que el camino se terminaba, a ustedes por siempre mi corazón y mi agradecimiento.

Familia

AGRADECIMIENTOS

A quienes participaron en la fase de investigación y experimento:

Dr. Gonzalo Martínez Barrera

Laboratorio de investigación y Desarrollo de Materiales Avanzados (LIDMA)

Dr. Fernando Ureña Núñez

Instituto Nacional de Investigación Nuclear (ININ)

M. en C. A. Liliana Ivette Ávila Córdoba

Unidad Académica Profesional Santiago Tianguistenco (UAEM)

CONTENIDO

	Página
RESUMEN	9
INTRODUCCIÓN	10
JUSTIFICACIÓN	12
HIPÓTESIS	14
OBJETIVOS	15
CAPÍTULO I MARCO TEÓRICO	
1.1 Reciclaje Mecánico y Químico de los Plásticos	17
1.2 Reciclaje por Radiación Gamma en Plásticos	18
1.2.1 Efecto Fotoeléctrico	20
1.2.3 Efecto Compton	20
1.2.4 Formación de Pares	21
1.3 Historia del Tetra Pak	24
1.3.1 Composición	26
1.3.2 Usos	27
1.3.3 Impacto Ambiental en la generación de envases de Tetra Pak	28
1.4 Polietileno	32
1.5 Aluminio	33
1.6 Cemento Portland	34
1.6.1 Fabricación del Cemento	36
1.6.2 Características del Cemento	38
1.6.3 Resistencia a la Compresión	39
1.6.4 Módulo de Elasticidad	40
1.7 Concreto Reforzado	43

CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS

	Página
2.1 Materiales	47
2.1.1 Equipo y Reactivos	48
2.2 Diagrama de flujo	49
2.3 Metodología	50
2.3.1 Elaboración de probetas testigo	50
2.3.2 Elaboración de probetas con Tetra Pak Brik Aseptic	50
2.3.3 Elaboración de pruebas de compresión	51

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados	53
3.1.1 Cemento	53
3.1.2 Agregados Minerales	53
3.1.3 Agua	54
3.1.4 Tetra Pak Brik Aseptic	55
3.1.5 Concreto hidráulico sin refuerzo	56
3.1.6 Concreto hidráulico con refuerzo	57
3.1.7 Evaluación de propiedades mecánicas de concreto hidráulico	58
3.1.8 Irradiación y evaluación de la resistencia de probetas de concreto	60
3.2 Discusión	
3.2.1 Agregado Grueso	61
3.2.2 Resistencia a la Compresión	61
a) Probetas Testigo	61
b) Concreto con Tetra Pak Brik Aseptic sin irradiar	62
c) Concreto con Tetra Pak Brik Aseptic irradiado	67
3.2.3 Deformación en el máximo esfuerzo	69
a) Concreto con Tetra Pak Brik Aseptic sin irradiar	69
b) Concreto con Tetra Pak Brik Aseptic irradiado	71

	Página
3.2.4 Modulo de Young	71
a) Concreto con Tetra Pak Brik Aseptic sin irradiar	71
b) Concreto con Tetra Pak Brik Aseptic irradiado	75
3.2.5 Análisis Comparativos entre concretos sin irradiar e irradiados	77
CONCLUSIONES	80
ANEXOS	81
REFERENCIAS	84

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I	MARCO TEÓRICO	Página
Figura 1.1	Efecto Fotoeléctrico	20
Figura 1.2	Efecto Compton	21
Figura 1.3	Formación de Pares	21
Figura 1.4	Grupos Carbonilo	23
Figura 1.5	Composición de un envase de Tetra Pak	26
Figura 1.6	Ciclo de Vida del Tetra Pak	29
Figura 1.7	Reciclaje común de envases de Tetra Pak	30
Figura 1.8	Tasa de reciclaje en México de envases de Tetra Pak	31
Figura 1.9	Estructura molecular del Polietileno	32
Figura 1.10	Proceso de fabricación del cemento	37
Figura 1.11	Curva Esfuerzo – Deformación	41
Figura 1.12	Tipos de esfuerzos	42
Figura 1.13	Esfuerzo – Deformación	43
CAPÍTULO II	MATERIALES Y MÉTODOS	
Figura 2.1	Procedimientos para la elaboración del concreto hidráulico reforzado e irradiado.	49
Figura 2.2	Procedimiento para el ensaye de las probetas de concreto hidráulico.	51
CAPÍTULO III	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
Figura 3.1	Cemento Portland	53
Figura 3.2	Granulometría de agregado grueso	54
Figura 3.3	Tamaños de Tetra Pak Brik Aseptic	55
Figura 3.4	Máquina Multiensayo Controls MR	60
Figura 3.5	Panel de control de la Máquina Universal de Pruebas	60

Figura 3.6	Resistencia-Deformación de concreto sin refuerzo	62
Figura 3.7	Resistencia-Deformación sin refuerzo con 10% de agregado	65
Figura 3.8	Imagen de SEM de concreto sin Tetra Pak y con 10% de agregado	66
Figura 3.9	Resistencia-Deformación con Tetra Pak a 28 días	68
Figura 3.10	Imagen de SEM sin laminillas de Tetra Pak y con 30% de agregado	70
Figura 3.11	Esfuerzo-Deformación unitaria y Módulo de Young con y sin irradiar	72
Figura 3.12	Módulo de Young de Tetra Pak a 28 días	75
Figura 3.13	Módulo de Young de Tetra Pak Irradiado	76
Figura 3.14	Efecto de la radiación gamma en probetas con Tetra Pak y en concreto testigo	78

ANEXOS

Figura 1.	Esquema de los componentes de un microscopio electrónico de barrido.	82
Figura 2.	Imagen del concreto con SEM.	83

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO I		Página
Tabla 1.1	Composición de un envase de Tetra Pak Brik Aseptic.	33
Tabla 1.2	Ciclo de vida del Tetra Pak.	33
Tabla 1.3	Reciclaje común de envases de Tetra Pak.	34
Tabla 1.4	Denominación según el tipo de cemento.	35
Tabla 1.5	Clasificación del cemento por características especiales.	35
 CAPÍTULO III		
Tabla 3.1	Especificaciones físicas del cemento.	53
Tabla 3.2	Granulometría de la grava.	54
Tabla 3.3	Composición porcentual de los componentes del envase.	55
Tabla 3.4	Cantidad de material para un m ³ de concreto.	56
Tabla 3.5	Cantidad de material para una probeta de concreto.	57
Tabla 3.6	Relación de probetas a los 7, 14 y 28 días de curado.	58
Tabla 3.7	Composición de las mezclas de concreto hidráulico reforzado.	59
Tabla 3.8	Condiciones del ensayo de compresión.	60
Tabla 3.9	Tiempos de residencia y dosis.	61
Tabla 3.10	Valores de pruebas testigo.	62
Tabla 3.11	Esfuerzo máximo, deformación y módulo de Young de los concretos sin refuerzo.	62
Tabla 3.12	Resistencia a la compresión de concreto con partículas sin irradiar.	62
Tabla 3.13	Resistencia a la compresión de concreto con partículas irradiadas	67
Tabla 3.14	Deformación en el máximo esfuerzo de concreto con partículas sin irradiar.	69
Tabla 3.15	Deformación en el máximo esfuerzo de concreto con Tetra Pak irradiado.	71
Tabla 3.16	Módulo de Young de concreto con partículas de Tetra Pak Brik Aseptic	73
Tabla 3.17	Módulo de Young de concreto con partículas irradiados	74

RESUMEN

Actualmente se ha creado el interés y la necesidad de innovar en la fabricación de nuevos materiales mediante el uso de materiales de desecho. Materiales que en la medida de lo posible cumplan con características físicas y químicas similares o mejoradas de los materiales a los cuales sustituirán.

Durante la presente investigación se recolectaron envases de Tetra Pak Brik Aseptic, después fueron cortados para obtener pedazos pequeños, los cuales mediante el proceso de reciclaje mecánico fueron reducidos a tamaños muy pequeños hasta el grado de partícula.

Se elaboraron probetas de concreto con cemento, agua, grava y arena, las cuales se denominaron “probetas testigo”, también se elaboraron probetas sustituyendo parte de la arena por partículas de Tetra Pak. A ambos tipos de probetas se les realizaron pruebas mecánicas de compresión. Posteriormente estos dos tipos de probetas fueron irradiadas con rayos gamma, y de igual manera se les realizó la prueba de compresión. De los datos obtenidos se calculó el módulo de Young. Finalmente se observaron las diferentes morfologías de las superficies de las probetas mediante microscopia electrónica de barrido, de las probetas modificadas e irradiadas.

El objetivo fue evaluar el efecto de la radiación gamma en las propiedades de las probetas elaboradas; la cual en principio causa cambios en la estructura química y morfología de las partículas de Tetra Pak Brik Aseptic dentro del concreto.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad se ha manifestado la necesidad del uso de materiales con propiedades específicas que aporten beneficios al concreto. En específico, dentro de la industria de la construcción, se requieren materiales como refuerzos que permitan mejorar las propiedades físicas y mecánicas, incrementando la durabilidad de estos materiales reforzantes expuestos a las condiciones ambientales normales.

Actualmente la tendencia es fabricar materiales de construcción livianos, de menor tamaño y con excelentes propiedades mecánicas y físicas, de bajo costo y fáciles de utilizar, pero lo importante es el beneficio que puedan traer al ambiente.

La producción y uso del concreto es uno de los rubros industriales más importantes en México; la industria cementera representa poco más de 20% del mercado nacional (H. W. Taylor, 2004). Razón por la que es de suma importancia proponer innovaciones con propuestas de materiales poliméricos usados como carga en el concreto, con el objetivo de mejorar sus propiedades físico químicas consiguiendo un beneficio al ambiente.

El desarrollo de envases de Tetra Pak representa un avance tecnológico. A partir de la segunda mitad del siglo XX se presentaron cambios en la producción y la comercialización de estos empaques, para la venta de diversos tipos de productos, cuyo consumo ha incrementado a su vez la producción en la industria del envase (González, B. A. G., 2004). Esta situación propicia la destrucción de recursos naturales, como contaminación de suelo, mantos acuíferos propiciando lluvia acida, etc.; como consecuencia de la extracción de las materias primas para su fabricación. Estos envases al no ser reintegrados al proceso en su totalidad a sus ciclos productivos, limitan su incorporación a otros productos, incrementando la explotación de la naturaleza.

En la presente investigación se realizó un estudio del comportamiento de los envases de Tetra Pak Brik Aseptic durante el reciclado mecánico y por radiación gamma y su reuso como sustituto de agregado fino en concreto.

Este trabajo consta de tres capítulos los cuales se mencionan a continuación:

- 1) En el capítulo I se consideran los aspectos teóricos sobre los temas involucrados durante la investigación.
- 2) En el capítulo II se consideran los materiales y métodos llevados a cabo durante la presente investigación.
- 3) En el capítulo III se presentan los resultados y discusión de los mismos.
- 4) Así como las conclusiones.

Presentando finalmente la técnica morfológica empleada en el apartado de anexos.

JUSTIFICACIÓN

Los envases de Tetra Pak Brik Aseptic® se han convertido en uno de los más importantes para el sector de envase y embalaje, ya que el tipo de materiales empleados aportan grandes beneficios a los productos para los que se destinan, permiten transportar alimentos con facilidad, lo que significa un ahorro de espacios de almacenamiento. De la misma forma el sabor y valor nutricional original a temperatura ambiente se conserva durante mucho tiempo, no se necesita refrigeración mientras no haya sido abierto y además el producto se encuentra higiénico, fresco y listo para servirse.

En México la producción de estos materiales es alrededor de seis mil millones de envases, que se distribuyen a una gran variedad de empresas.

Hoy en día los envases de Tetra Pak Brik Aseptic una vez que se han utilizado, van a parar directamente a los vertederos o basureros municipales, lo cual genera un impacto negativo para el ambiente. Actualmente los países que consumen grandes cantidades de este tipo de envases son Estados Unidos, Canadá, Brasil, Argentina y Colombia países que al tiempo están desarrollando nuevas tecnologías para reciclado así como campañas para que las personas desde su hogar separen y clasifiquen sus residuos, facilitando el proceso de reciclado y disminuyendo costos.

El reciclaje de ciertos residuos sólidos como el Tetra Pak Brik Aseptic cobró importancia ambiental, social y económica al evitar que estos desechos lleguen a los rellenos sanitarios.

Por medio de los métodos de reciclado mecánico y químico es posible concebir un material reforzado como es el caso del concreto y reducir el uso de arena pero al mismo tiempo reducir costos y mejorar las propiedades.

De acuerdo a lo anteriormente planteado, con la recuperación de los envases de Tetra Pak Brik Aseptic propuesto en este proyecto de investigación, se ayudará a disminuir en parte la contaminación ambiental causada por el uso indiscriminado de estos envases.

HIPÓTESIS

Las propiedades físicas y mecánicas del Tetra Pak Brik Aseptic se modifican al ser sometido a procesos de reciclado mecánico y por radiación gamma, lo que permitirá su reuso como sustituto de agregado fino en concreto.

OBJETIVOS

Objetivo general:

Modificar las propiedades fisicoquímicas de envases de Tetra Pak a través de dos métodos de reciclado: mecánico y por radiación gamma para su reuso como sustituto de agregado fino en concreto.

Objetivos específicos:

- ∅ Reducir el tamaño de partículas de envases de Tetra Pak mediante molienda a 0.5, 1.5 y 3.0mm.
- ∅ Caracterizar las partículas de Tetra Pak sin irradiar e irradiadas mediante técnicas de Microscopía Electrónica de barrido (SEM).
- ∅ Elaborar probetas de concreto hidráulico reforzado con partículas de Tetra Pak irradiado y sin irradiar a distintos porcentajes en masa: 10, 20 y 30%.
- ∅ Caracterizar las probetas mediante pruebas físicas y mecánicas,; resistencia a la compresión, módulo de elasticidad y deformación unitaria.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

1.1 Reciclaje Mecánico de los Plásticos

El reciclaje mecánico es un proceso comúnmente utilizado para varios materiales plásticos, el cual consiste en el reprocesamiento mediante triturado, lavado y posteriormente introducción en una máquina para luego ser moldeado por alguno de los métodos tradicionales de transformación. Se aplica para los termoplásticos como por ejemplo PE, PP, PET, etc.

El reciclaje químico consiste en la descomposición de la estructura de los plásticos para obtener materia prima. Se aplica en materiales que están degradados o es casi imposible aislarlos de la mezcla en la que se encuentran. Se usa comúnmente en films pequeños, películas y plásticos heterogéneos en general.

Como ya se mencionó anteriormente los envases de Tetra Pak Brik Aseptic tienen cuatro capas de plástico y puede ser reciclado mediante dos sistemas:

- Reciclaje conjunto: se realiza mediante una serie de procesos físico-químicos que dan en la mayoría un producto aglomerado.
- Reciclaje por separado: donde los componentes mediante procesos físico-químicos para ser aprovechados de forma independiente. En primer lugar se separan las fibras de celulosa del polietileno y del aluminio mediante contacto y fricción en una solución acuosa. Después de un filtrado se apartan por un lado, el agua con la fibra de celulosa y por otro, la granza de polietileno reforzada por el aluminio. La recuperación de la celulosa supone el reciclado del 80% del envase. La otra fracción compuesta por el aluminio y el polietileno, pueden usarse como combustible en cementeras o someterlos a tratamientos con disolventes para recuperar el polietileno o mediante combustión para recuperar el aluminio (Publicaciones Vértice S.L., 2012).

El sector del embalaje es apto para el reciclado mecánico, debido a que se utilizan solo seis tipos de polímeros, los cuales no contienen sustancias peligrosas ya que se utilizan principalmente para envases de alimentos. Los residuos son relativamente jóvenes debido al corto periodo de tiempo transcurrido entre la producción y el consumo. En la actualidad que el porcentaje de plásticos utilizados en embalaje que se reciclan está incrementando.

1.2 Reciclaje por Radiación Gamma de Plásticos

Una tecnología alternativa para el reciclaje de plásticos es el uso de técnicas químicas como la radiación gamma.

La radiación química es definida como el estudio de los defectos químicos causados por el paso de una radiación ionizante a través de la materia, proveniente de sustancias sometidas a transformaciones nucleares, desde su exterior en forma de rayos cósmicos y de partículas aceleradoras (Charlesby, A., 2007) (Dole, M., 2006).

La radiación es la única fuente de energía que puede iniciar reacciones a cualquier temperatura, incluida la temperatura ambiente, bajo cualquier presión, en fase distinta, ya sea sólida, líquida o gas y sin el uso de catalizadores (Cleland, M., 2003).

La radiación gamma es parte del espectro electromagnético cuya energía la ubica en el grupo de la radiación ionizante, se genera en el núcleo cuando este experimenta una transición de un estado de energía más alta a un estado energético más bajo (aniquilación de un par positrón-electrón). Los fotones de los rayos gamma interactúan con la materia y causan ionización mediante los fenómenos conocidos como: efecto Fotoeléctrico, efecto Compton y creación de pares, es decir, electrón – positrón.

Cuando se somete un material polimérico a la radiación ionizante, ésta provoca efectos tanto físicos como químicos dependiendo de la naturaleza de los polímeros así como de la dosis aplicada. En los polímeros la radiación gamma

provoca tres tipos de modificación: degradación, entrecruzamiento e injerto, los cuales son controlados mediante una adecuada dosis de radiación (Martínez-Barrera, G. y Brostow, W., 2009).

Para mejorar las propiedades mecánicas del concreto estudios recientes confirman que los concretos poliméricos que son irradiados directamente, tienen valores de resistencia a la compresión mayores que los concretos elaborados con fibras previamente irradiadas, diferencia que se aprecia notablemente para dosis medias de radiación (100 kGy). Dicho efecto está presente para los valores de deformación y módulo de elasticidad (Martínez-Barrera, G., Viguera-Santiago, E., Hernández-López, S., Menchaca-Campos, C., Brostow, W., 2005) (Ávila, et. al; 2013).

A pesar de lo anterior, son escasas las investigaciones encaminadas a evaluar el efecto de la radiación gamma en concretos (Martínez-Barrera, G., 2009). Uno de los pocos trabajos en el área, fue desarrollado por Martínez-Barrera, donde se realizó la modificación de fibras del nylon-6 a dosis de 5, 10, 50, y 100 kGy de radiación gamma; en este caso, se elaboraron las muestras y se midió la resistencia a la compresión. Los valores más altos de resistencia a la compresión del composito se lograron con fibras irradiadas a 50 kGy yañadidas al 2 % en volumen; la resistencia a la compresión fue de 122.2 MPa, con respecto a 35 MPa para el concreto simple, (Martínez-Barrera, G., 2006).

La radiación gamma es de tipo electromagnético, es decir, se produce generalmente por elementos radioactivos, el isotopo más empleado es el cobalto 60 (^{60}Co), con una vida media de 5.27 años.

Los rayos gamma son un tipo de radiación ionizante capaz de penetrar en la materia aún más profundo que la radiación alfa o beta, debido a las altas energías que poseen (Ramachandran, 1999). La unidad de dosis absorbida para medir la radiación gamma es el Gray (Gy) que corresponde a un Joule de energía ionizante/kilogramo de material expuesto.

La radiación gamma de polímeros representa una aplicación de importancia tanto en el ámbito tecnológico como de investigación; es utilizado para modificar las propiedades físicas y químicas de un gran número de productos hechos a partir de materiales poliméricos.

Cuando un material es expuesto a la radiación gamma, se llevan a cabo diversos fenómenos los cuales son: efecto fotoeléctrico, efecto Compton y formación de pares, que a continuación se describen.

1.2.1 Efecto fotoeléctrico

En este caso la radiación atraviesa el material y se produce una colisión entre un fotón incidente y un átomo del material. La energía total del fotón puede ser empleada para expulsar un electrón de una órbita profunda del átomo (Figura 1.1).

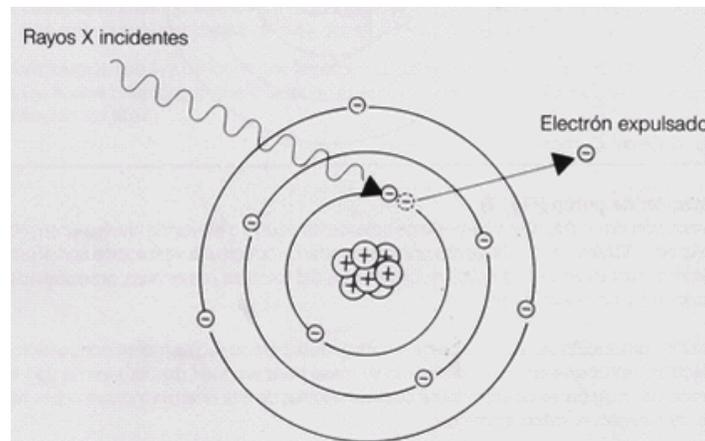


Figura 1.1 Efecto Fotoeléctrico (Aguilar, H., 1998)

1.2.2 Efecto Compton

Parte de la energía del fotón se transfiere a los electrones, los cuales son expulsados. Los fotones disminuyen en la energía cedida, son desviados de su dirección inicial y emergen como radiación difusa de baja energía (Figura 1.2).

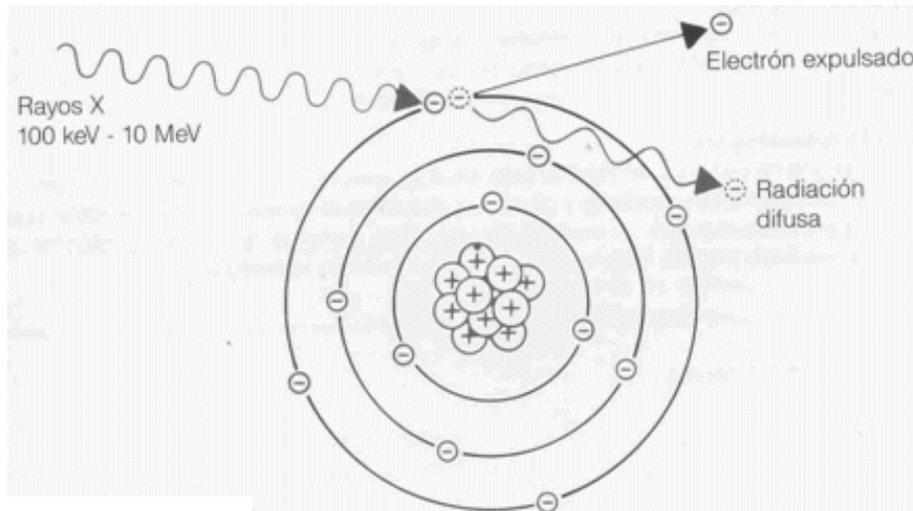


Figura 1.2 Efecto Compton (Aguiar, H., 1998)

La pérdida de energía sufrida por la radiación incidente depende del tipo de material irradiado y de la energía de la radiación.

1.2.3 Formación de Pares

Únicamente ocurre a elevados niveles energéticos y consiste en; la formación de un par electrón-positrón (desde 1,02 MeV). Los fotones de alta energía pueden producir una interacción con el núcleo del átomo involucrado en la colisión. Se observa cuando la energía del fotón se materializa produciendo un electrón (e^-) y un positrón (e^+), (Figura 1.3).

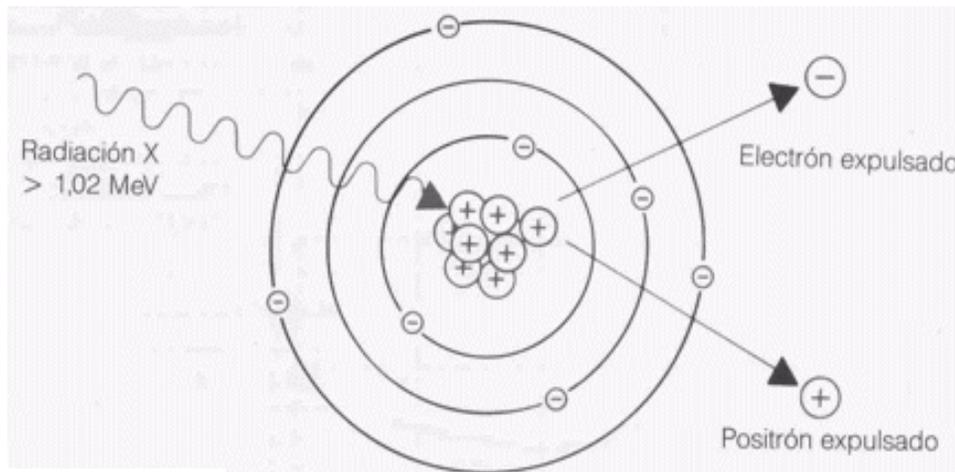


Figura 1.3 Formación de Pares (Aguiar, H., 1998)

Cuando se somete material polimérico a la acción de radiación ionizante, se producen efectos físicos y químicos que dependen de la dosis aplicada y de la naturaleza de los polímeros en cuestión. Es bien conocido que la radiación gamma provoca tres tipos de modificación en los polímeros:

Los cuales pueden ser controlados mediante una adecuada dosis de radiación. La ventaja de trabajar con polímeros es la gran sensibilidad a cambios en los enlaces químicos, obteniéndose materiales con propiedades diferentes en: cristalinidad, densidad, coeficiente de expansión térmica, módulo de elasticidad, permeabilidad, así como la resistencia a la corrosión, a la abrasión y a disolventes.

Los cambios en las propiedades de un polímero después de la irradiación, se deben en principio a la reordenación geométrica de su estructura de enlace. Algunas propiedades mecánicas se pueden explicar en función de la rigidez de las cadenas que tiende a evitar que estas se deslicen sobre otras como consecuencia de la orientación de las cadenas laterales, induciendo un cierto grado de cristalinidad.

Los efectos de la irradiación sobre los polímeros suelen evaluarse a través de la estructura química de la muestra irradiada (mediante el análisis de la distribución de pesos moleculares, el aumento de las ramificaciones de las cadenas, del mayor reticulado de la muestra, etc.), y de su comportamiento mecánico.

Diversos estudios revelan que la exposición de polietileno a rayos gamma mejora sus propiedades mecánicas tales como la dureza Rockwell, que se incrementa a partir de dosis correspondiente a 200 kGy y se mantiene estable en intervalos de 250 - 2000 kGy.

El efecto de la irradiación de materiales compuestos de polietileno ha demostrado la alta capacidad que tiene este polímero para entrecruzarse. Sin embargo, también existen otros fenómenos presentes: que se describen a continuación:

a) Proceso de degradación: que implica crosslinking en dosis cercanas a 250 kGy.

b) La escisión de cadena en dosis mayores a 250 kGy.

La irradiación gamma induce la formación de grupos carbonilo (Figura 1.4), acompañada de escisión de la estructura molecular, lo que provoca una disminución de la cristalinidad, la dureza y temperatura de fusión, aclarando que esto ocurre en dosis bajas de irradiación gamma.

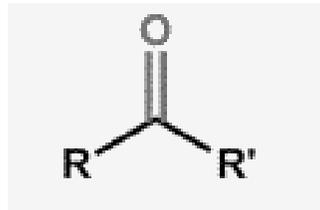


Figura 1.4 Grupo Carbonilo.

Por ejemplo, al irradiar celulosa o papel se presentan diversos cambios: el rompimiento de cadenas se observa para dosis superiores a 30 kGy, con porcentajes de 6 a 12 % de degradación. Para dosis superiores a 1700 kGy, la degradación se alcanza hasta en un 82 %, mientras que el 100 % se observa con dosis superiores a 6.55 MGy.

El grado de cristalinidad es un parámetro que confiere al material protección: para las fibras de celulosa, disminuye ligeramente (50%) en el intervalo de dosis de 20 - 120 kGy, mientras que en dosis más altas de 300 a 4500 kGy existe una disminución del grado de cristalinidad mucho mayor y se reduce en 100% para dosis de 1.9×10^6 kGy. Cuanto mayor sea la dosis de radiación, mayor es la degradación de la celulosa.

Estos cambios que se producen en la celulosa debido a la radiación (cristalinidad, reticulación y degradación) afectan directamente propiedades tales como: densidad, coeficiente de expansión térmica, módulo de elasticidad, así como la resistencia a la corrosión, abrasión y a disolventes.

1.3 Historia del Tetra Pak

Los orígenes de este material surgieron en una empresa de origen sueco líder de la industria del envasado, fundada en 1959 por el Dr. Ruben Rausing, quien inventó un revolucionario envase para alimentos líquidos en forma de tetraedro, llamado Tetra Classic (CEMPRE, 2013).

Este envase surge de un concepto básico consistente en formar un tubo a partir de un rollo de papel recubierto de plástico (Polietileno), para después llenarlo y sellarlo por debajo del nivel del líquido, garantizando así la máxima higiene y calidad. Por sus indiscutibles ventajas (resistencia, durabilidad, higiene y economía), el envase Tetra Classic incursionó en todos los mercados del mundo incluyendo México donde en 1961 se abrió la primera planta de producción de envases fuera de Europa.

Los primeros clientes de Tetra Pak México fueron Rancho La Palma y el INPI – Instituto Nacional de Protección a la Infancia, que encontró en los envases de Tetra Pak el medio ideal para reforzar su programa de Desayunos Escolares, ya que este envase podía ser transportado fácilmente, garantizando que la leche llegara en óptimo estado a todos los rincones del país. Lo anterior implicó un gran avance en beneficio de los niños de México. Unos años más tarde (1966), el envase Tetra Classic también se utilizaba para envasar bebidas refrescantes, con tal éxito que algunas de las cuales todavía están presentes en el mercado (Tetra Pak, 2012).

Tetra Pak hace una gran contribución a los grandes cambios que México y el mundo sufren durante los años 60's, al introducir en 1969 el envase Tetra Pak Brik Aseptico, el cual da mayor tiempo de vida al producto sin necesidad de refrigeración y sin conservadores, a la vez que ofrece grandes ventajas para su distribución, almacenamiento y exhibición. Las primeras empresas en México que comercializaron sus productos en envases Tetra Brik Aseptico empezaron a hacerlo a partir de 1972.

El envase Tetra Pak Brik Aseptic causó una auténtica revolución en la industria alimentaria, misma que repercutió en beneficio de otras áreas, ya que sus características hicieron posible que programas como el de Asistencia Alimentaria del DIF extendiera el reparto gratuito de leche hasta los rincones más apartados del país.

Tetra Pak en México se constituyó como empresa en 1960 y el 6 de junio de 1961 se inauguraron las instalaciones en Naucalpan, Estado de México, contando, desde ese momento, con fabricación local de material de envase.

La segunda planta industrial fue establecida en el estado de Querétaro en 1993. Estas instalaciones cuentan con la más avanzada tecnología para la fabricación de material de envase y popotes, en 1994 recibió la certificación ISO 9002 y en 1998 la certificación ISO 14001. En 2008 Tetra Pak México concluyó un programa de expansión e inversiones que permitió incrementar la capacidad de producción de su planta de material de envasado en Querétaro, para poder fabricar alrededor de ocho mil millones de envases al año. Esta capacidad adicional, está totalmente disponible para abastecer el mercado mexicano a partir de agosto de 2008 (Tetra Pak, 2012).

Bajo los dos diferentes sistemas de impresión, Flexo Line y Flexo Process, en la planta de Tetra Pak Querétaro se producen, actualmente, material de envasado para los sistemas: Tetra Brik y Tetra Brik Aseptic, Tetra Classic y Tetra Classic Aseptic, y Tetra Wedge Aseptic, en sus diferentes tamaños y laminaciones (CEMPRE, Nov 2012).

1.3.1 Composición

Los envases de Tetra Pak están conformados por 6 capas que evitan el contacto con el medio externo, y aseguran que los alimentos lleguen a los consumidores con todas sus propiedades intactas, las cuales se mencionan a continuación (Figura 1.5):

- 1) Primera capa. Polietileno: Protege el envase de la humedad exterior.
- 2) Segunda capa. Papel: Brinda resistencia y estabilidad.
- 3) Tercera capa. Polietileno: Ofrece adherencia fijando las capas de papel y aluminio.
- 4) Cuarta capa. Aluminio: Evita la entrada de oxígeno, luz y pérdida de aromas.
- 5) Quinta capa. Polietileno: Evita que el alimento esté en contacto con el aluminio.
- 6) Sexta capa. Polietileno: Garantiza por completo la protección del alimento.

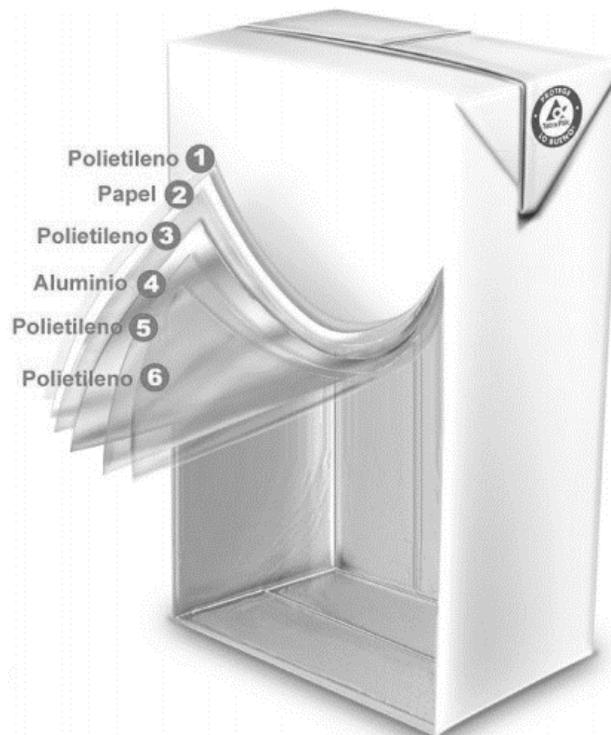


Figura 1.5 Composición de un envase Tetra Pak (Román, A., 2011).

Características del envase

- 1) Preservación de la cantidad nutricional del alimento.
- 2) Protección de la luz y el calor.
- 3) 100% reciclable.
- 4) Preservación del sabor y el aroma.

Como se observa en la composición del envase se emplean tres materiales distintos en diferentes porcentajes:

- 1) Cartón: constituye el 75% del envase.
- 2) Polietileno: constituye el 20% del envase.
- 3) Aluminio: constituye el 5% del envase.

1.3.2 Usos

Actualmente se utilizan estos envases en distintos contenedores para alimentos como:

a) Lácteos

Ofrece una gama completa de soluciones de procesamiento y envasado de leche.

b) Soja y alternativas lácteas

Son fuentes de proteínas saludables y de alta calidad que contienen por lo general aminoácidos esenciales para el crecimiento. Por lo que requieren de un buen envase para su conservación.

c) Bebidas

Desde agua hasta bebidas de frutas, vinos y licores. Ayuda a obtener lo mejor del procesamiento y envasado de toda clase de bebidas suaves, para mantener la frescura y conservar su sabor.

d) Vinos y Licores

El envase de cartón ofrece una excelente protección al vino resulta muy conveniente para el consumidor.

e) Alimentos preparados

Ofrece variedad de soluciones y envasado de alimentos en atractivos envases que garanticen la esterilidad y seguridad comercial.

1.3.3 Impacto ambiental en la generación de envases de Tetra Pak

En los años 50's Ruben Rausing fundó Tetra Pak con el principio de que un envase debe ahorrar más de lo que cuesta, refiriéndose al aspecto económico sino que también no debía presentar un impacto al ambiente y a la sociedad como aspecto indispensable de sustentabilidad lo cual usó una serie de estrategias a las cuales llamó ciclo de vida (Figura 1.6), el que inicia con el diseño de los envases y los materiales con que son fabricados, la obtención de materias primas, su producción, llenado y distribución, hasta el punto en el que son consumidos.

Enfoque de ciclo de vida

Minimizando impactos ambientales

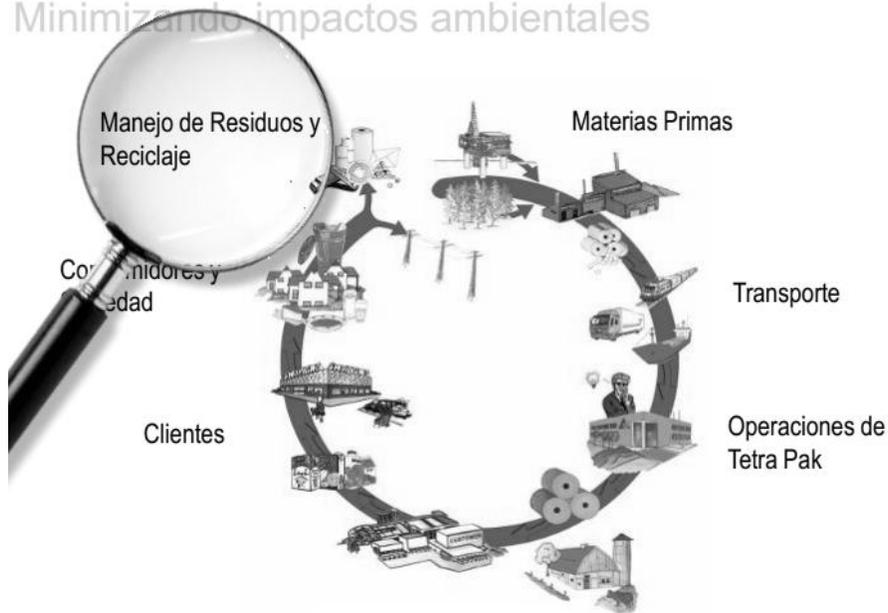


Figura1.6 Ciclo de Vida del Tetra Pak (Villegas, J., 2011).

Por ejemplo, el principal material utilizado para fabricar un envase de Tetra Pak es el papel que proviene de un recurso renovable (los bosques). Tetra Pak ha logrado progresivamente reducir la intensidad de uso de los materiales necesarios para producir sus envases.

El envase de cartón para bebidas es uno de los más livianos que existe. El envase de un litro actualmente pesa 28 g. (20% menos que hace 20 años). Esto se ha logrado utilizando menos papel para fabricar el envase y empleando el polietileno de baja densidad, que es el plástico que ofrece el máximo rendimiento utilizando una mínima cantidad de ese material y por último al que constituye la capa más delgada del envase la cual mide 6.5 micrones, considerando este espesor para los nuevos envases de Tetra Brik Aseptic (los cuales contienen un 30% menos de aluminio que cuando fue creado) se logra utilizar menos recursos para producir, almacenar y transportar los envases de cartón así como al contenido de los mismos, generando menos residuos por cada envase fabricado.

Una vez llenos los envases, la carga equivale a 95% de producto y sólo el 5% es de envase. En la Unión Europea, el 25% de éstos contenedores se están recuperando para la generación de energía (vapor y electricidad). Esto representa el equivalente de más de 93.750 toneladas de petróleo al año [CEMPRE, 2012].

Finalmente, una vez que el envase de Tetra Pak ha cumplido su función como herramienta de distribución de alimentos tiene cierto valor residual que hoy día puede ser recuperable mediante varias técnicas existentes como:

- Incineración para recuperación de energía
- Reciclaje para hacer papel
- Fabricación de láminas y productos aglomerados

A continuación, en la Figura 1.7 se muestra el proceso clásico de reciclaje usado para estos envases postconsumo.

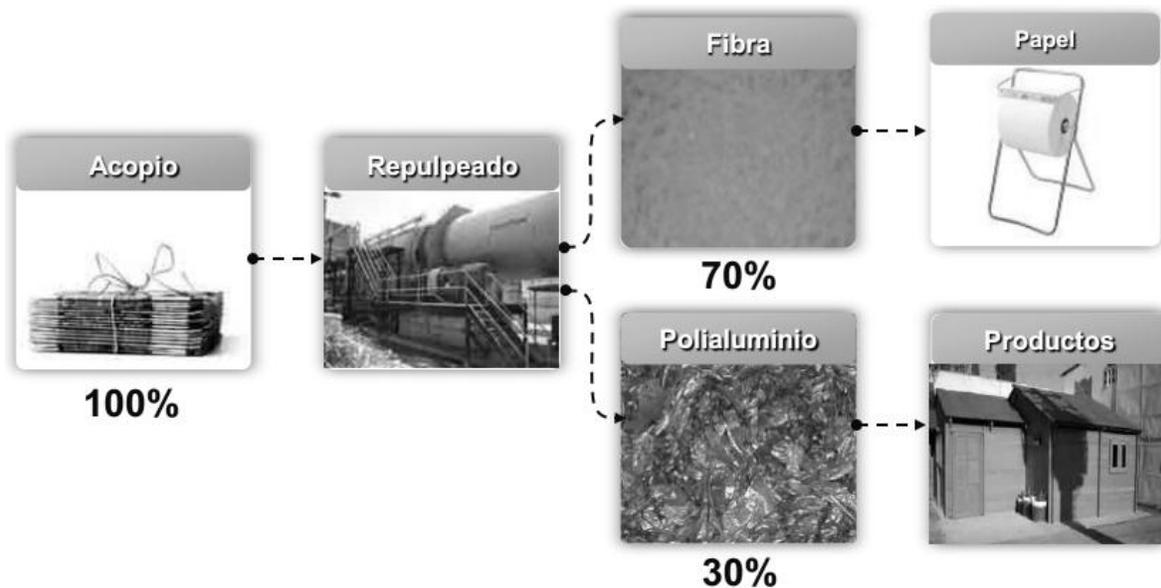


Figura 1.7 Reciclaje común de Envases de Tetra Pak (González, C., 2011).

El uso de Tetra Pak Brik Aseptic ha beneficiado a varios productos brindándoles mayor capacidad de almacenamiento sin necesidad de conservadores o refrigeración de los mismos.

En el reciclaje de Tetra Pak Brik Aseptic, Alemania, España y Brasil son pioneros, hoy día recuperan el 80% de los desechos que generan (Antioquia, 2004).

En países como Colombia se recicla solo el 14% a partir de todos los residuos generados por los mismos (Tetra Pak, Sep. 2013).

Desde el año 1992 existen dos sistemas para reciclar el Tetra Pak Brik Aseptic el primero, ideado en Alemania, utiliza el conjunto de los componentes para fabricar un aglomerado similar al obtenido de la madera. Sin embargo, es una vía limitada, ya que no es un material de alta rentabilidad.

La segunda vía es un sistema ideado por una empresa española que permite separar los componentes de los envases de Tetra Pak Brik Aseptic y reintroducirlos o bien en el ciclo productivo (caso del papel y el aluminio) o bien para generar energía (del polietileno).

En México hay estados donde ya existen plantas recicladoras de Tetra Pak. En la Figura 1.8 se muestra la tasa de crecimiento en el consumo de estos envases en México.

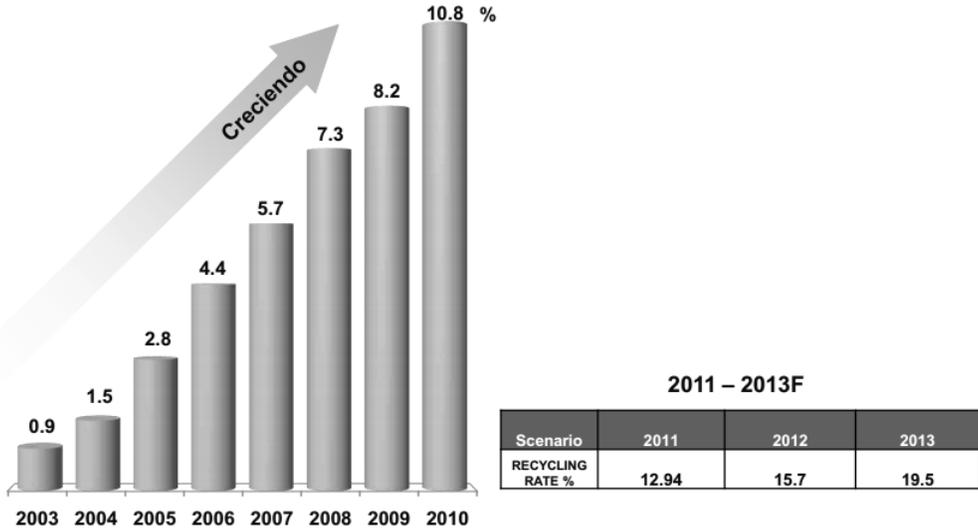


Figura 1.8 Tasa de Reciclaje en México de Envases de Tetra Pak (Alcatara, H., 2013)

Cabe mencionar que en dichas plantas el material prioritario que reciclan es el papel o celulosa, con el fin de crear papel reciclado. Y el residuo restante el cual es llamado Polialuminio ya se ha podido separar en investigaciones realizadas en México (Tetra Pak, Mar. 2014).

El Polialuminio se utiliza como material reciclado en tejas, mobiliario y pallets, entre otros artículos domésticos.

1.4 Polietileno

El Polietileno es un polímero sintético termoplástico que se obtiene por polimerización del etileno (Figura 1.9). La producción anual de polietileno (PE, por sus siglas en inglés) es de 80 millones de toneladas. Su uso principal es para embalajes (bolsas de plástico, láminas y películas de plástico, contenedores incluyendo botellas, etc.).

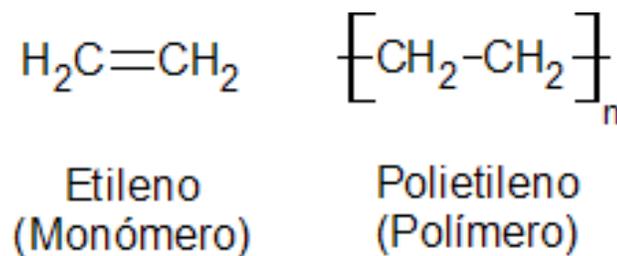


Figura 1.9 Estructura molecular del polietileno (William, G., 1996).

De acuerdo a la densidad se puede clasificar en tres tipos diferentes de polietileno:

a) Polietileno de baja densidad (LDPE), es un polímero de cadena ramificada, que se obtiene por polimerización del etileno a altas presiones por el mecanismo de radicales libres.

b) Polietileno de mediana densidad ($0.93 - 0.94 \text{ g/cm}^3$), se emplea en la fabricación de tuberías.

c) Polietileno de alta densidad (HDPE: $0.941 - 0.954 \text{ g/cm}^3$), es un polímero con estructura lineal y muy pocas ramificaciones, es incoloro, inodoro, no tóxico y

resistente tanto a esfuerzos mecánicos como a agentes químicos. En la Tabla 1.1 se muestran las propiedades del polietileno.

Tabla 1.1 Propiedades físicas y mecánicas del polietileno (Primo, E., 1996).

Propiedad	Valor
Punto de Fusión °C	110
Densidad	
a 20°C	0.92
a 50°C	0.90
a 80°C	0.87
Esfuerzo de rotura MPa	8 – 10
Módulo de Young MPa	0.15
Resistencia a la tracción a 20 °C MPa	14.7
Dureza Brinell (bola de 2 mm de diámetro y 3 kg)	2

1.5 Aluminio

El aluminio es un metal no ferroso y el de mayor abundancia mundial, constituye el 8% de la porción sólida de la corteza terrestre, es el metal más abundante en el mundo. Las principales propiedades que hacen del aluminio un material valioso son su ligereza, resistencia a la corrosión, excelente conducción de electricidad, no es magnético, fácil de ensamblar y reciclable al 100%. Las propiedades del aluminio se muestran en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2 Propiedades del aluminio (Kalpakjian, S., 2002).

Propiedad	Valor
Densidad kg/cm ³	2.69
Punto de fusión °C	660
Punto de ebullición °C	2519
Conductividad térmica W/(K·m)	237
Módulo elástico GPa	70
Resistencia a la tracción MPa	130-195

Donde:

W/(K.m): Vatios entre Kelvin por metro

GPa: Giga Pascales

MPa: Mega Pascales

Actualmente existen varias investigaciones donde este material ha sido utilizado para envases de alimentos, no perjudicando la integridad e inocuidad de los mismos y de los seres humanos. Así como posterior al consumo de dichos envases el Al es un material 100% reciclable.

1.6 Cemento Portland

El cemento es un material inorgánico finamente pulverizado, que al adicionarle agua o agregados minerales, tiene la propiedad de fraguar y endurecer en virtud de reacciones químicas durante la hidratación. Cuando el cemento es mezclado con agua y arena forma el concreto.

El cemento Portland tiene una densidad de 1.35 g/m^3 , y consiste de cuatro compuestos fundamentales (Tabla 1.3).

Tabla 1.3 Composición del Cemento Portland con nomenclatura (Noris, R., 2003).

Compuesto	Notación abreviada
Silicato Dicálcico	C_2S
Silicato Tricálcico	C_3S
Aluminato Tricálcico	C_3A
Aluminoferritotetracálcico	C_4AF

Cabe mencionar, que las variaciones en la concentración de estos cuatro compuestos son relativas, razón por la cual se tienen diferentes tipos de cemento Portland.

La clasificación de los tipos de cemento de acuerdo a su composición esta proporcionada por la norma NMX-C-414-ONNCCE-1999 (Tabla 1.4).

Tabla 1.4. Denominación según el tipo de cemento (CANACEM, Sep. 2013).

Tipo	Denominación
CPO	Cemento Portland Ordinario
CPP	Cemento Portland Puzolánico
TPEG	Cemento Portland con Escoria Granulada de alto Horno
CPC	Cemento Portland Compuesto
CEG	Cemento con Escoria Granulada de alto Horno

Y de acuerdo a sus características especiales (Tabla 1.5):

Tabla 1.5. Clasificación del cemento por características especiales (Galindo, G., 2007).

Nomenclatura	Características Especiales de los Cementos
RS	Resistente a los sulfatos
BRA	Baja reactividad alcalina agregado
BCH	Bajo calor de hidratación
B	Blanco

La resistencia mecánica normal de un cemento es la resistencia mecánica mínima a la compresión a los 28 días y se indica como 20, 30, 40 N/mm². Un saco de cemento, tiene una clasificación integrada por: composición + resistencia + característica especial. Es decir, si el cemento es TPEG 30 RS, se trata de un cemento con adición de escoria granulada, con una resistencia normal y resistente a los sulfatos.

1.6.1 Fabricación del cemento Portland

La fabricación de cemento es una actividad industrial de procesamiento de minerales la cual se divide en tres etapas (Figura 1.10):

Etapa 1. Aquí se lleva a cabo la obtención, preparación y molienda de materias primas provenientes de piedras calizas y arcillosas, tales como la caliza, marga, arcilla y pizarra que portan los siguientes compuestos minerales:

- a) Carbonato de calcio (CaCO_3) constituye entre el 70 y 75%.
- b) Óxido de silicio (SiO_2).
- c) Óxido de aluminio (Al_2O_3).
- d) Óxido de hierro (Fe_2O_3) constituyente entre el 20 y 25%.
- e) Silicio (2 a 3%) y Hierro (hasta en 1%).

Se obtiene una mezcla de los minerales en forma de polvo denominada crudo o harina.

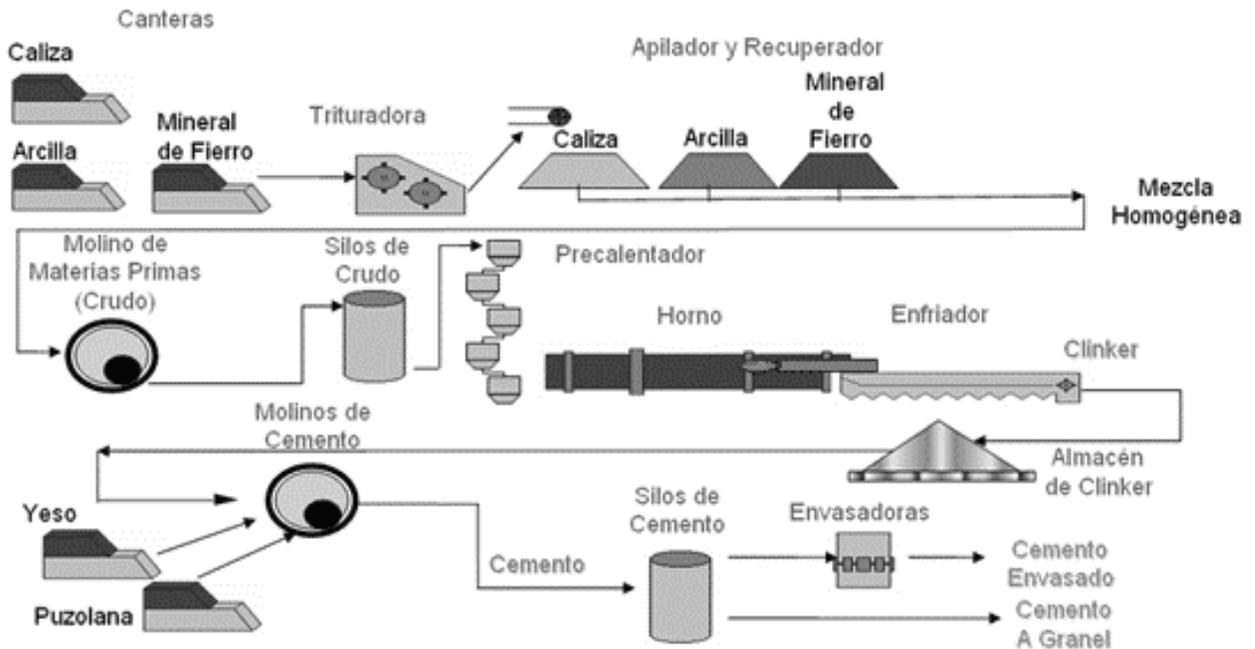


Figura 1.10 Proceso de Fabricación del Cemento (CANACEM, Oct. 2013).

Etapa 2. Se lleva a cabo la cocción del crudo en hornos rotatorios hasta alcanzar una temperatura cercana a los 1450°C, para posteriormente ser enfriado bruscamente y obtener un producto intermedio denominado Clinker.

Etapa 3. El Clínter se muele en el molino de bolas. Durante la molienda se incorpora un 3% de yeso, aditivo que regula el tiempo de fraguado; también se adicionan otros componentes como escorias de alto horno, cenizas volátiles, caliza, puzolanas, que determinan los distintos tipos de cemento. El cemento molido se conserva dentro de enormes silos, para ser protegido de la humedad del ambiente (Publicaciones Vértice, 2012).

Cuando el cemento se mezcla con agua, se llevan a cabo reacciones de hidratación que producen una pasta sólida. El endurecimiento inicial es producido por la reacción del agua, el yeso y el aluminato tricálcico (Bermejo, R. 2012). El sucesivo endurecimiento es debido a una reacción más lenta entre el agua y el silicato tricálcico.

1.6.2 Características del concreto

La influencia que el cemento ejerce durante el comportamiento y adquisición de propiedades de la pasta cementante, derivan fundamentalmente de la composición química del Clínter y de su finura de molienda.

Existen factores con ciertos efectos decisivos que evitan que las mezclas de concreto segreguen durante su manejo y colocación. Entre tales factores puede mencionarse la composición granulométrica, el tamaño máximo del agregado, el consumo del cementante y finalmente los aditivos inclusores del aire.

De tal forma, un cemento con alto contenido de silicato tricálcico (C_3S) y elevada finura pueden producir mayor resistencia a corto plazo. En caso opuesto, un cemento con alto contenido de silicato dicálcico (C_2S) y finura moderada hace más lenta la resistencia inicial y como consecuencia genera calor en el concreto.

Los materiales minerales son porosos en mayor o menor grado, algunos poseen numerosos vacíos relativamente grandes, que en su mayoría se hallan interconectados. Por otra parte, los agregados con un alto porcentaje de porosidad manifiestan un coeficiente de permeabilidad comparativamente alto. Aún más la forma, tamaño y distribución de los vacíos influye también en el grado de permeabilidad.

El empleo de agregados porosos secos, tiende a reducir la consistencia inicial, por efecto de su alta capacidad para absorber agua de la mezcla.

Ningún compuesto de los agregados es completamente inerte cuando entra en contacto con la pasta del cemento, esto debido a las reacciones químicas que en distinto grado suelen producirse entre ambos. Es cuando algunas de estas reacciones son benéficas porque contribuyen a la adhesión entre el agregado con la pasta de cemento, mejorando las propiedades mecánicas del concreto. Hay otras que generan expansiones internas que causan daño y pueden destruir el concreto.

Conviene evaluar las características que contribuyen a definir la calidad del cemento dentro de ellas se encuentran: peso específico, porosidad, resistencia mecánica, resistencia a la abrasión y módulo de elasticidad (Alatorre, J., Uribe, R., 1998), los cuales se describen a continuación.

1.6.3 Resistencia a la Compresión

Resistencia a la compresión se puede definir como la máxima resistencia medida de un espécimen de mortero a carga axial. Generalmente se expresa en kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm^2) o en MPa; para el concreto es promedio de 20.5 MPa (Taylor, H., 1997).

En el concreto la mayoría de las partículas de los agregados permanecen dispersas dentro de la pasta de concreto y de este modo, no se produce contacto permanente entre ellas. La resistencia mecánica del concreto ya endurecido, (especialmente a compresión), depende más de la resistencia de la pasta de cemento y de su adherencia con los agregados, que de la resistencia propia de los agregados individuales.

Cuando se trata de concreto de muy alta resistencia, [con valores superiores a los 500 kg/cm^2 (49 MPa)] o de concreto compactado con rodillo, donde se produce contacto entre las partículas de los agregados, la resistencia mecánica de éstos tiene mayor influencia en la resistencia del concreto (Askeland, 1998).

Los agregados gruesos no sufren desgaste, rotura o desintegración de partículas por efecto de la abrasión, esto es una característica que suele considerarse como un índice de su calidad. Las propiedades elásticas de estos agregados afectan al concreto ya endurecido, específicamente en su módulo de elasticidad.

La resistencia a la compresión es la propiedad más característica e importante del concreto, las demás propiedades mecánicas se evalúan con referencia a ésta.

El valor de la resistencia a la tensión del concreto es aproximadamente de 8 a 12% de su resistencia a compresión y a menudo se estima de 1.33 a 1.99 veces la raíz cuadrada de la resistencia a compresión. La resistencia al esfuerzo

cortantedel concreto puede variar desde el 35 al 80% de la resistencia a compresión (Nawy, E., 1995).

La resistencia a la compresión se mide mediante el ensayo a compresión en cilindros de 50mm de diámetro por 100 mm de altura, con las ventajas de menor consumo de concreto y menor peso para el transporte de los cilindros.

Varía significativamente con algunos parámetros tales como: la relación del agua-cemento, el tamaño máximo de agregados, las condiciones de humedad durante el curado y la edad del concreto (Melvin, K., 1998).

1.6.4 Módulo de Elasticidad

Se denomina módulo de elasticidad a la razón entre el incremento de esfuerzos y el cambio correspondiente a la deformación unitaria.

La deformación es una medida del grado en que se deforma un cuerpo; para esfuerzos lo suficientemente pequeños, el esfuerzo es proporcional a la deformación: donde dicha constante de proporcionalidad se llama módulo de elasticidad (Eisberg, L., 1993).

El esfuerzo es una cantidad proporcional a la fuerza causante de la deformación. Específicamente es la fuerza que actúa sobre el objeto por unidad de área transversal (Sears, F., 1997).

Si el esfuerzo es de compresión, el modulo es denominado módulo de Young y tiene el mismo valor para una tensión que para una compresión, por tanto siendo una constante independiente del esfuerzo siempre y cuando no exceda un valor máximo será denominado límite elástico(Figura 1.7).

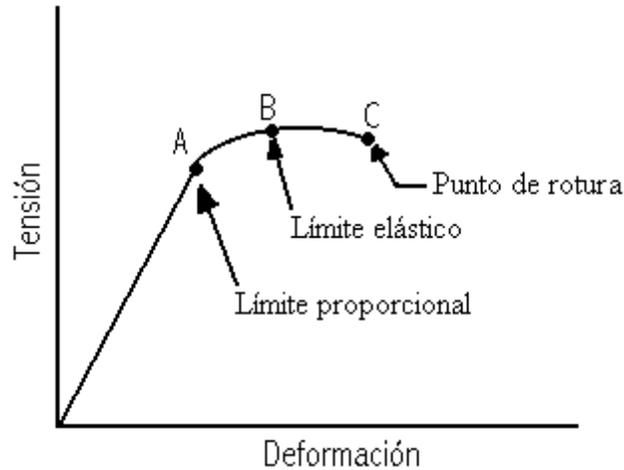


Figura 1.11 Curva Esfuerzo – deformación (Steven, R., 2002).

Se dice que cuando se sobrepasa el límite elástico y se suprime el esfuerzo aplicado, el material queda permanentemente deformado.

Donde el valor B indica la magnitud de la deformación permanente, llevándolo hasta el punto de la ruptura como se observa en el valor C.

El punto de fluencia se define como la intersección de una paralela a la línea de la zona elástica que pasa por el punto de deformación permanente (Melissinos, A., 1995).

Método Estático: considerando una superficie cualquiera en el interior de una barra, las partículas que están en uno de los lados ejercerán fuerzas sobre las partículas que están en el lado opuesto, estas fuerzas cumplen con el principio de acción y reacción.

Tomando en cuenta la dirección de esas fuerzas interiores, para cada sección transversal se manifestaran momentos internos, los cuales recibirán su nombre de acuerdo a la dirección de la fuerza. Por tanto si la barra se somete a esfuerzos transversales se hablará de momentos flectores pero si se efectúan esfuerzos de corte, se manifestarán momentos de torsión. En el caso de la investigación el método estático utilizado fue la prueba de compresión(Figura 1.12).

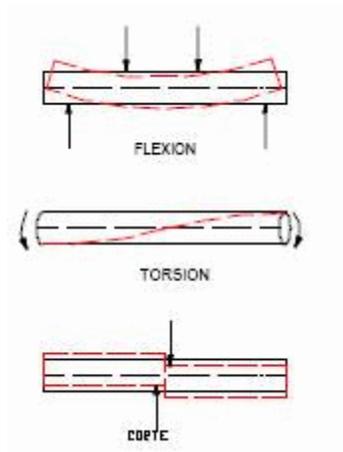


Figura 1.12 Tipos de esfuerzos (Romero, M., 2002).

Método dinámico: los equipos de ultrasonido se emplean para determinar la homogeneidad y la integridad estructural del concreto. Con este método es posible obtener información acerca de las propiedades del concreto por investigación sónica las cuales pueden ser: homogeneidad, cavidades, presencia de grietas, roturas, deterioro, módulo de elasticidad y resistencia del concreto.

Este método consiste en medir el tiempo que tarda un impulso ultrasónico en atravesar la masa de concreto, midiendo directamente el módulo de elasticidad dinámico y relacionándolo con la resistencia mecánica del material (Feynman, L., 1971).

Los concretos de resistencias distintas tienen diferentes grados de rigidez y bajo esfuerzos iguales sus deformaciones serán diferentes, es decir, tendrán módulos de elasticidad distintos. Todos los materiales usados para la construcción se deforman sin incremento de carga cuando los esfuerzos internos sobrepasan el límite elástico. Hablando de elementos de concreto sometidos a carga, existe también una tendencia a cambiar su forma o tamaño con el transcurso del tiempo, llamándole a esta deformación, flujo plástico (Imcyc, 1999).

En comparación con los materiales elásticos, el concreto carece de un grado de proporcionalidad entre los esfuerzos y las deformaciones. Los fenómenos de flujo plástico y de contracción son un tanto similares.

El efecto del flujo plástico es equivalente a una disminución en el módulo de elasticidad y puede usarse sólo para el cálculo de las deformaciones que se presentarán inmediatamente después de las cargas de servicio.

Las propiedades de los concretos, tales como la relación: esfuerzo – deformación, esfuerzo de tensión, módulo de elasticidad, esfuerzo cortante y esfuerzo de adherencia se expresan en términos del esfuerzo generado en cilindros sometidos a compresión uniaxial.

Dichas expresiones se han basado en datos experimentales para esfuerzos de compresión en concretos menores de 410 kg/cm^2 (40MPa).

El esfuerzo – deformación para diversos concretos está en función de la resistencia del concreto y de las características de los agregados (Figura 1.9):

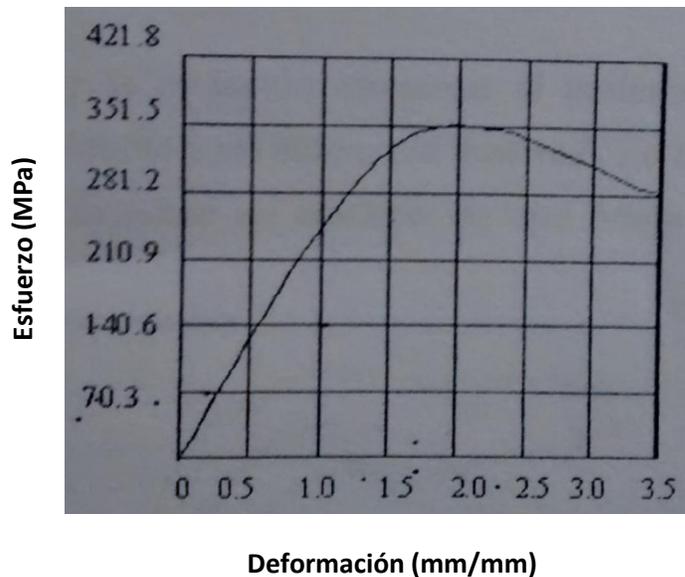


Figura 1.13 Curva Esfuerzo-Deformación para concreto de 350 kg/cm^2 (34MPa).

1.7 Concreto Reforzado

Este material de construcción es el más utilizado, debido a que posee una gran resistencia a la acción del agua sin sufrir deterioros, además puede ser fácilmente moldeado para dar una gran variedad de formas y tamaños (Mehta, K., 2007).

En las mezclas de concreto, la incorporación de refuerzos reduce el costo, ayuda a mejorar las propiedades que varían de acuerdo al reforzante que se le adiciona. Por tanto es importante que este sea compatible con la matriz cementante y resistente al ataque de los productos de hidratación del cemento (Muciño, R., 2007).

Es obtenido a partir de una pasta integrada por cemento, grava, arena, agua y materiales de refuerzo.

Los concretos reforzados con materiales poliméricos datan de los años 60's y se desarrollaron para conseguir una mayor adherencia y resistencia al desgarre (Falcinelli, O., 2002).

Este tipo de materiales poliméricos se puede clasificar en tres categorías:

- 1) *Concreto polimérico (CP)*: se forma al polimerizar una mezcla de monómero y un agregado, sin que exista ningún otro material aglutinante presente.
- 2) *Concreto modificado con látex (CML)* o también llamado concreto de cemento portland con polímero: este se elabora sustituyendo una parte del agua de mezclado por látex.
- 3) *Concreto impregnado con polímero (CIP)*: se produce impregnando o infiltrando con un monómero el concreto de cemento portland endurecido y subsecuentemente polimerizando *in situ* (ACI, 2009), (Tawfik, M., 2006).

Actualmente en la industria de la construcción, el concreto reforzado es ampliamente utilizado en obras de ingeniería y edificación y ha tenido logros espectaculares debido a las elevadas resistencias que alcanza, rompiendo la frontera económica impuesta por el uso del acero (Ramachandran, 1999).

En los concretos se adiciona una matriz cementante o aglutinante puede ser de naturaleza cerámica (yeso, cal hidratada, arcilla, cemento portland, azufre), o polimérica (resina epóxica, acrílico, polipropileno, betún, brea, asfalto). Estas fibras

reforzantes pueden ser naturales como plátano, coco, corteza de caña y algunos tipos de bambú (Osorio, S., 2007).

CAPÍTULO II

MATERIALES Y MÉTODOS

CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales

Tetra Pak

El material de reciclaje se obtuvo de desechos domésticos. Los cuales fueron lavados, secados y recortados en tres distintos tamaños.

Arena Sílice

La arena sílice utilizada en la mezcla para concreto fue de calibre 0.15mm de acuerdo a la Norma ASTM C 33: "Especificaciones de los Agregados para el Concreto", y la Norma Oficial NOM C-111-ONNCCE-2004: "Agregados para el concreto hidráulico" (Tamayo, J., 2004).

Grava

La grava utilizada fue de grado fino 0.15mm de acuerdo a la norma ASTM C 33: "Especificaciones de los Agregados para el Concreto".

Cemento

Para la elaboración de probetas cilíndricas se utilizó Cemento Portland de resistencia Rápida (CPC 30 R) conforme a la norma mexicana para cementos hidráulicos NOM-C-414-ONNCCE-2004 (ONNCCE, 2009).

Agua

Agua potable del Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Materiales Avanzados (LIDMA) en la cual no se apreció olor, ni color, cumpliendo así con la Norma Oficial NOM C-122-ONNCCE-2004 (DFO, 2011).

Desmoldante

Como medio desmoldante se utilizó aceite para motor.

2.1.1 Equipo y Reactivos

Moldes metálicos

Se utilizaron moldes cilíndricos de 10 cm de alto por 5 cm de diámetro de acuerdo a la Norma (Imcyc, 2006).

Máquina de ensayos

Máquina Multiensayo Controls^{MR}

Microscopio

Irradiador Transelektro LGI-01 provisto con fuentes de ⁶⁰Co, manufacturado por IZOTOP Institute of Isotopes Co. Ltd., Budapest Hungría.

2.2 Diagrama de Flujo

En la Figura 2.1 se muestra el diagrama de flujo con los procedimientos llevados a cabo para la elaboración del concreto hidráulico sin y con refuerzo de Tetra Pak Brik Aseptic.

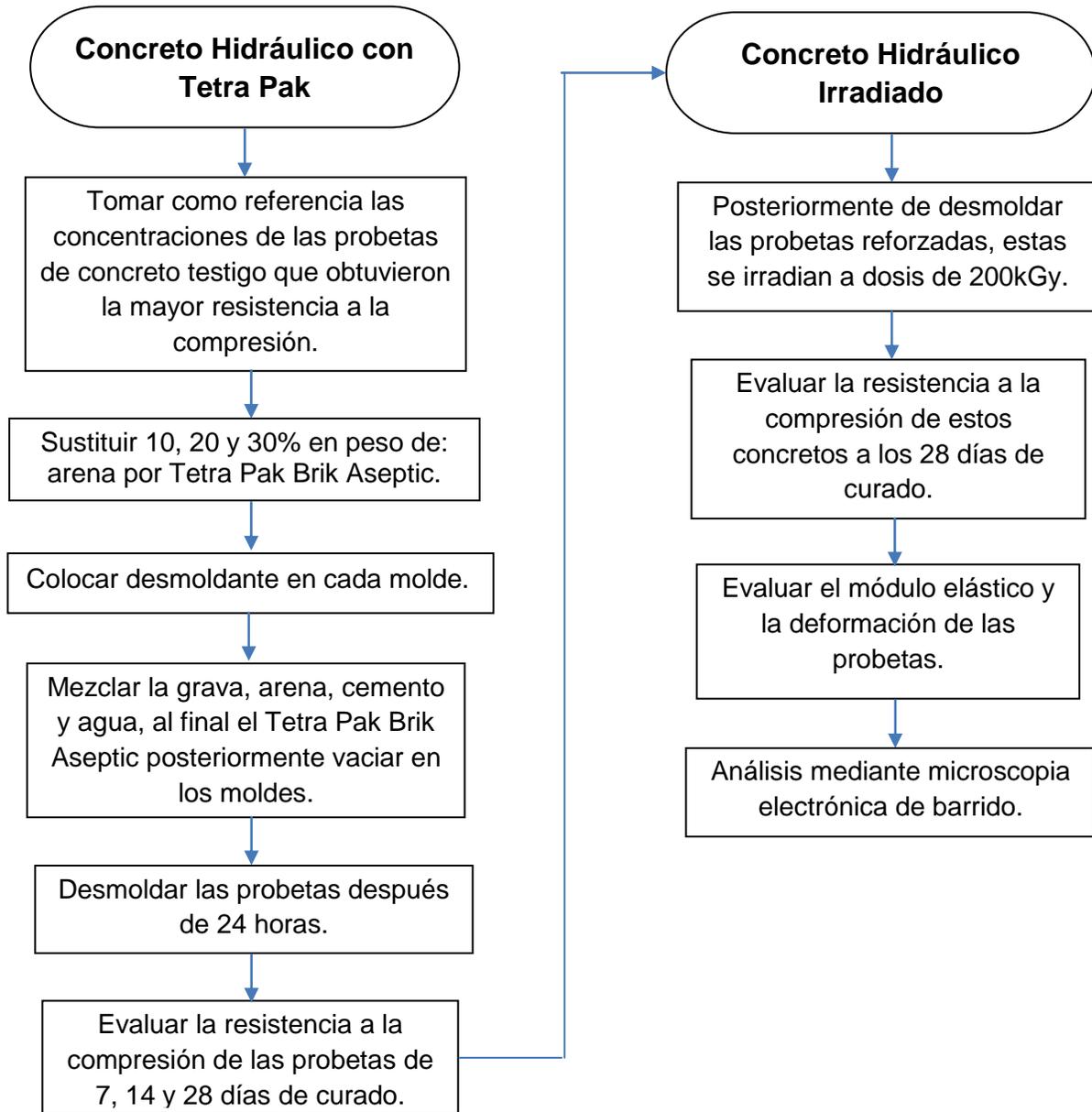


Figura 2.1 Procedimientos para la elaboración del concreto hidráulico reforzado e irradiado.

2.3 Metodología

2.3.1 Elaboración de probetas testigo

Se tomaron valores estimados para la realización de las probetas testigo las cuales fueron base para la elaboración:

- a) Se limpió el molde y se verifico que el montaje de los tornillos con las mariposas para evitar fugas de la mezcla.
- b) Se pesaron las cantidades establecidas de cada uno de los materiales mencionados anteriormente con una báscula granataria con capacidad para 5kg.
- c) Se mezclaron todos los materiales secos hasta tener una mezcla homogénea en un recipiente de acero inoxidable.
- d) Se agregó la mitad del agua y se mezcló perfectamente, posteriormente se agregó el agua restante.
- e) Previamente se colocó en los moldes aceite como medio desmoldante en el interior del molde.
- f) Se vació la mezcla de cemento hasta el límite del molde dejando la superficie totalmente lisa.
- g) Debe permanecer 24 horas dentro del molde para curado.
- h) Se aflojó el molde para permitir la expulsión de la probeta.

2.3.2 Elaboración de probetas con Tetra Pak Brik Aseptic

Se realizan los pasos anteriormente considerando los que se mencionan a continuación:

- i) De la cantidad de arena que se pese el 10, 20 y 30% se sustituye por cada tamaño de Tetra Pak Brik Aseptic a utilizar.
- j) Este se agrega antes de mezclarlo con el agua.

2.3.3 Elaboración de prueba de compresión

A continuación se muestra un diagrama para la elaboración de la prueba de compresión realizada en la Máquina de Ensayo descrita anteriormente:

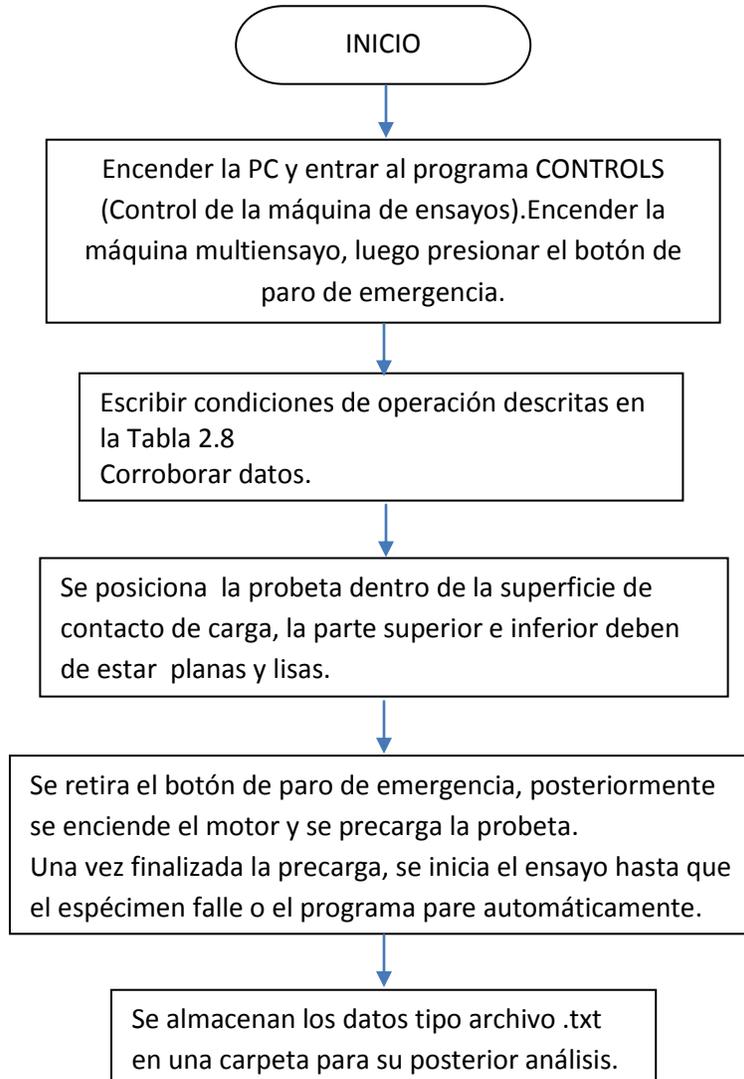


Figura 2.2 Procedimiento para prueba de compresión de las probetas de concreto hidráulico.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados

3.1.1 Cemento

La resistencia a la compresión del cemento se muestra a continuación(Tabla 3.1):

Tabla 3.1 Especificaciones físicas del concreto.

Resistencia a la compresión (MPa)		
3 días	28 días	
Min.	Min.	Max.
20	20	50

El tamaño de partículas del cemento es conveniente para dar acabados finos o tersos en construcciones(Figura 3.1). La incorporación de componentes naturales (puzolanas, arcillas) en su formulación mejora la durabilidad resistencia de las obras a construir.



Figura 3.1 Cemento Portland

3.1.2 Agregados Minerales

El tamaño de partícula del agregado se determinó por medio de tamices de malla de alambre de aberturas cuadradas de acuerdo a la Norma NMX-C-077-ONNCCE-2004: “Agregados para concreto hidráulico. Análisis granulométrico método de prueba” (ONNCCE, 2010).El agregado fino utilizado para la elaboración

de las probetas fue arena sílice de 0.15 mm (malla 100), mientras que el agregado grueso fue grava. La granulometría se muestra en la (Tabla 3.2); las pruebas de la misma se aprecian en la Figura 3.2 respectivamente.

Tabla 3.2 Granulometría de la grava, 1000 gr.

Tamiz No. / Abertura	Peso Retenido (g)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje que pasa (%)	Porcentaje acumulado (%)
3/8" (9.5 mm)	65	6.5	93.5	6.5
4 (4.75 mm)	120	12.0	81.5	18.5
10 (2 mm)	725	72.5	9	91.0
20 (0.84 mm)	55	5.5	3.5	96.5
25 (0.70 mm)	20	2.0	1.5	98.5
Charola	15	1.5	0	100
Total	1000	100		



Figura 3.2 Granulometría de agregado grueso

3.1.3 Agua

Para la elaboración de concreto se utilizó agua potable del Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Materiales Avanzados (LIDMA), ubicado en la Unidad el Rosedal de la Facultad de Química (UAEM), no se apreció olor, ni color, cumpliendo así con la Norma Oficial NMX C-122-ONNCCE-2004.

3.1.4 Tetra Pak Brik Aseptico

Los valores porcentuales de los componentes de los envases usados se muestran en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Composición porcentual de los componentes del envase (Turrado, J., 2011).

Tipo de Envase	Componentes		
	Fibra (%)	Polietileno (%)	Aluminio (%)
Lala, 1 Lt (Tetra Brik Aseptico)	74.0	19.5	6.5
Del valle, 1 Lt (Tetra Brik Square Aseptico)	74.0	19.5	6.5
Ades, 200 mL (Tetra Brik Aseptico)	74.0	19.5	6.5
Boing, 250 mL (Tetra Brik Aseptico)	71.5	23.1	5.4
Boing, 250 mL (Tetra Brik Aseptico)	71.5	23.1	5.4

Los envases recolectados se lavaron para retirar residuos del líquido (a fin de evitar la formación de microorganismos), posteriormente se secaron y cortaron en tres distintos tamaños, los cuales se identificaron como T1, T2, T3 (Figura 3.3).



Figura 3.3 Tetra Pak Brik Aseptico

3.1.5 Concreto hidráulico sin refuerzo

Considerando las dimensiones de una probeta cilíndrica, se obtuvo el volumen requerido para cada probeta:

$$\begin{aligned}L &= 10 \text{ cm} \\r &= 2.5 \text{ cm} \\V &= \pi r^2 L \\V &= \pi * (2.5 \text{ cm})^2 * (10 \text{ cm}) = 196.350 \text{ cm}^3 \\V &= 1.96 * 10^{-4} \text{ m}^3\end{aligned}$$

Para la elaboración de probetas de concreto hidráulico sin refuerzo se utilizaron relaciones iguales de materiales pétreos y la proporción de agua fue lo que se iba variando; con el fin de encontrar la más resistente a la compresión.

Se elaboró un lote de 3 probetas a distintos tiempos de curado, es decir; 7, 14 y 28 días para posteriormente realizar el ensayo de compresión. Contando con un total de 9 probetas para probarlas y obtener el estándar de resistencia a la compresión.

La Tabla 3.4 muestra los valores de cada uno de los componentes que fueron la base de cálculo para realizar las estimaciones de cantidad y relación de concreto a utilizar.

Tabla 3.4 Cantidad de material para un m³ de concreto

Material	Volumen (m ³)	Peso (kg)
Cemento	0.167	0.420
Agregado fino	0.249	0.918
Agregado grueso	0.416	1.152
Agua	0.108	0.413
Aire atrapado	0.060	---
Total	1.000	2.903

Tomando en consideración que se requiere una cantidad de 2.903 kg para un 1 m³ de concreto; entonces para una probeta se requiere de:

$$1.96 * 10^{-4} \text{ m}^3 = 0.48383 \text{ Kg}$$

En la Tabla 3.5 se muestran las concentraciones en peso de los componentes para una probeta, tomada como referencia para la elaboración de concreto sin y con refuerzo.

Tabla 3.5 Cantidad de material para una probeta de concreto

Material	Cantidad (g)
Cemento	70.0
Agregado fino	153.0
Agregado grueso	192.0
Agua	68.83
Total	483.83

3.1.6 Concreto hidráulico con refuerzo

Se elaboró un lote de 9 probetas para cada relación, es decir, se contó con un total de 27 especímenes. Se realizó la prueba de resistencia a la compresión a cada probeta, con la finalidad de encontrar la más resistente a la compresión.

A continuación se muestra la matriz relacionando el porcentaje con el tamaño de Tetra Pak Brik Aseptic y días de curado Tabla 3.6.

Tabla 3.6 Relación de Probetas a los 7, 14 y 28 días de curado.

Tamaño en mm (Código)	% de Tetra Pak		
	10	20	30
0.5 (T1)	3	3	3
1.5 (T2)	3	3	3
3.0 (T3)	3	3	3

Las probetas de concreto hidráulico reforzado (cilindros de 5 cm de diámetro x 10 cm de altura) se elaboraron con 3 diferentes porcentajes de sustitución en peso de agregados (10, 20 y 30%). Y considerando los tres tamaños del Tetra Pak Brik Aseptic (T1, T2 y T3).

En la Tabla 3.7 se calculan las concentraciones de los componentes utilizados en la elaboración de una probeta de concreto reforzada con Tetra Pak Brik Aseptic.

Tabla 3.7 Composición de las mezclas de concreto hidráulico reforzado.

	Probeta (Código)	Cemento (g)	Arena (g)	Grava (g)	Agua (g)	Cantidad Tetra Pak (g)
Con Tetra Pak	T1-14-10	420.0	826.2	1152.0	413	91.8
	T1-14-20	420.0	734.4	1152.0	413	183.6
	T1-14-30	420.0	642.6	1152.0	413	275.4
	T2-14-10	420.0	826.2	1152.0	413	91.8
	T2-14-20	420.0	734.4	1152.0	413	183.6
	T2-14-30	420.0	642.6	1152.0	413	275.4
	T3-14-10	420.0	826.2	1152.0	413	91.8
	T3-14-20	420.0	734.4	1152.0	413	183.6
	T3-14-30	420.0	642.6	1152.0	413	275.4

3.1.7 Evaluación de propiedades mecánicas de concreto hidráulico

La evaluación de la resistencia mecánica a la compresión de las probetas de concreto hidráulico se realizó en una Máquina Universal de Ensayos marca Controls^{MR} con capacidad de 30 toneladas, localizada en el Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Materiales Avanzados (LIDMA) de la Facultad de Química de la UAEM como se observa en la Figura 3.4.



Figura 3.4 Máquina Multiensayo Controls^{MR} localizada en el LIDMA de la Facultad de Química.

La Máquina Universal de Ensayos está equipada con un software que proporciona los datos del ensayo de compresión de acuerdo a la norma. A manera de ejemplo, en la Figura 3.5 se muestra el panel de control con las condiciones de trabajo utilizadas.

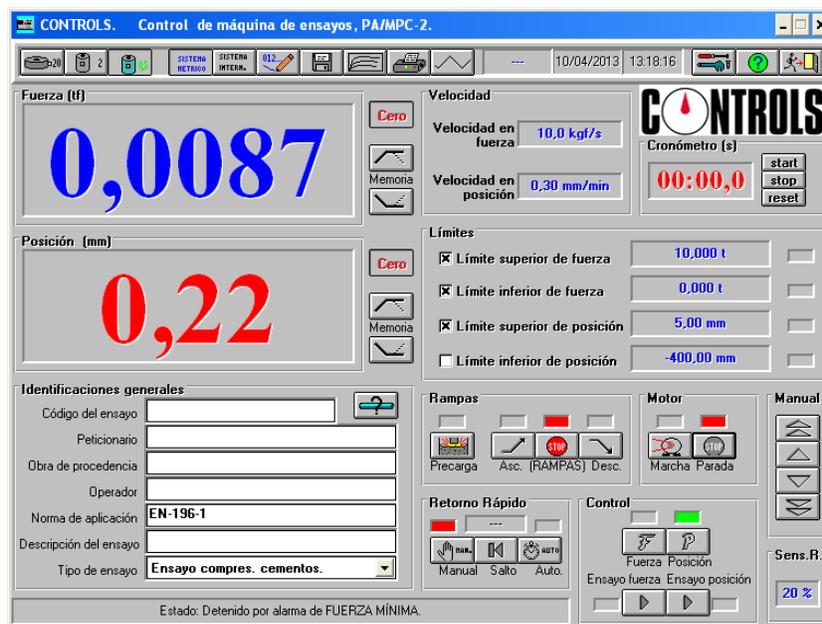


Figura 3.5 Panel de control de la Máquina Universal de Ensayos

En la Tabla 3.8 se muestran las condiciones de trabajo para la prueba de compresión de concreto hidráulico.

Tabla 3.8 Condiciones del ensayo de compresión.

Parámetro	Condición
Velocidad (en fuerza)	10 kgf/s
Velocidad (en posición)	0.30 mm/min
Límite superior de fuerza	10 t
Límite superior de posición	5 mm
Variable de control	Posición

De los datos obtenidos de fuerza y deformación en la Máquina Universal se determinó el módulo de Elasticidad, mediante un análisis posterior de los datos arrojados por el software.

3.1.8 Irradiación y evaluación de la resistencia de probetas de concreto

Las probetas se irradiaron a dosis de 200kGy, en aire y a temperatura ambiente en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ); a una tasa de dosis de 2.5 kGy/h en un irradiador Transelektro LGI-01 provisto con fuentes de ⁶⁰Co, manufacturado por IZOTOP Institute of Isotopes Co. Ltd., Budapest Hungría.

Los tiempos de residencia que se requiere para alcanzar las dosis en la cámara de irradiación, se calculan mediante:

$$t = \frac{Dr}{Td}$$

Donde t = tiempo de residencia, Dr = dosis requerida, y Td = tasa de dosis. Por lo cual, en la Tabla 3.9 se muestran los tiempos requeridos.

Tabla 3.9 Tiempos de residencia y dosis

Tiempo de exposición (Días)	Dosis de radiación (kGy)
3.3	200

Se evaluó la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad a la probeta que obtuvo los valores más altos.

3.2 Discusión

3.2.1 Agregados gruesos

La finalidad de realizar el análisis anterior facilitó la elección del tamaño de agregado grueso con el cual se realizaron las probetas de concreto, para este caso como los moldes son de 10 cm de alto x 5 cm de diámetro; se optó por usar partículas retenidas por el tamiz No. 3/8”.

3.2.2 Resistencia a la Compresión

a) Probetas Testigo

Los ensayos de resistencia a la compresión se realizaron a las probetas testigo, es decir probetas sin partículas de Tetra Pak. Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 3.9, los cuales varían entre 15 y 22 MPa. Se observan que la resistencia aumenta conforme avanza el tiempo de curado. El valor a 28 días (22 MPa) se encuentra en el valor promedio del valor estándar para un concreto convencional.

Tabla 3.9 Resistencia a la compresión de concreto testigo

Tiempo de curado (días)	Resistencia a la Compresión (MPa)
7	15.5±0.3
14	17.2±0.5
28	22.7±0.4

Para las probetas de concreto a 28 días de curado, la resistencia a la compresión es muy similar (Tabla 3.10), pero no así los valores de deformación unitaria, los están por encima del valor estándar, de 0.003 mm/mm.

Tabla 3.10 Resistencia y deformación de concreto testigo.

Probeta Testigo (Código)	Resistencia a la Compresión (MPa)	Deformación unitaria (mm/mm)
C1	21.7	0.010
C2	22.5	0.011

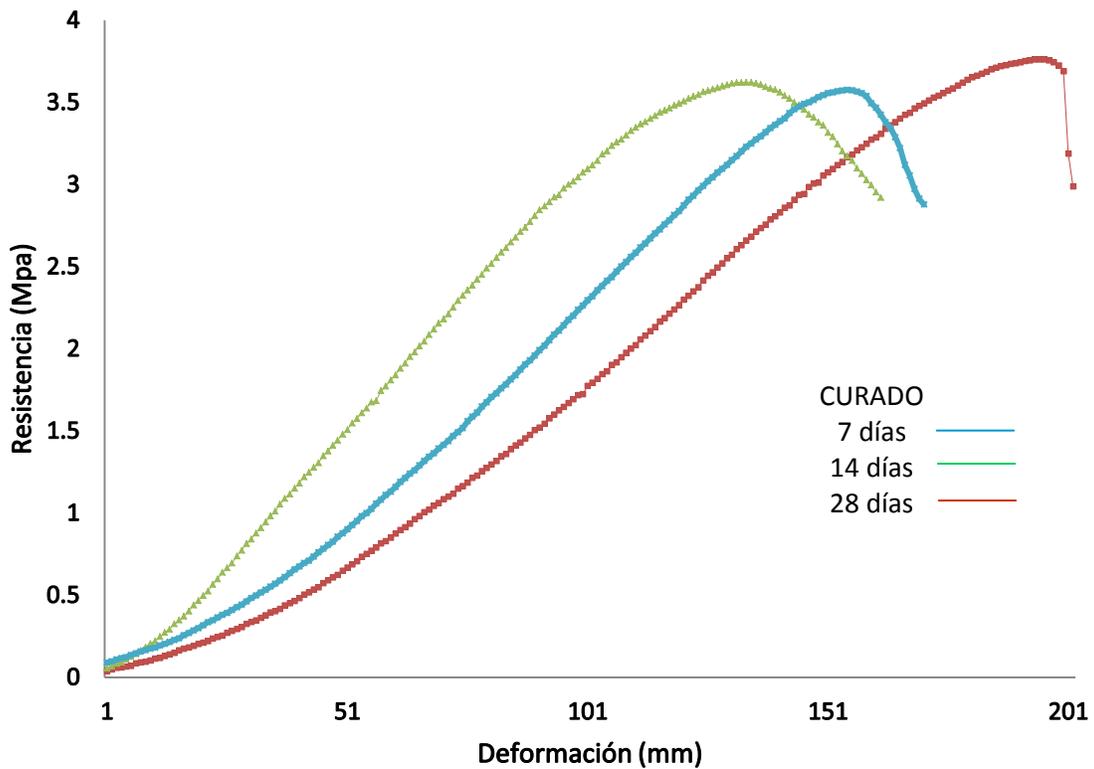


Figura 3.6 Resistencia vs Deformación de concreto sin refuerzo.

b) Concreto con Tetra Pak Brik Aseptic sin Irradiar

Se emplearon 10% de contenido de Tetra Pak Brik Aseptic en sustitución del agregado fino (arena sílice) en la elaboración de las probetas de concreto reforzado.

De acuerdo a lo reportado en la literatura, para aumentar la resistencia a la compresión del concreto existen varias alternativas, entre ellas está el agregar algún tipo de aditivo (acelerante, retardante, reductor de agua, etc.). En este trabajo se propuso como herramienta de mejoramiento a la radiación gamma y el uso de las partículas de Tetra Pak Brik Aseptic.

En la Tabla 3.12 se muestra la comparación en resistencia a la compresión de estos concretos sin irradiar.

Tabla 3.12 Resistencia a la compresión de concreto con partículas sin irradiar

Laminillas de Tetra Pak (%)	Tiempo de curado (días)	Resistencia a la Compresión (MPa)
0	7	15.5±0.32
	14	17.2±0.59
	28	22.7±0.45
10	7	11.2±0.40
	14	12.5±0.35
	28	14.6±0.29
20	7	8.6±0.29
	14	9.6±0.22
	28	9.8±0.21
30	7	5.6±0.31
	14	6.8±0.35
	28	6.9±0.25

El espécimen que presentó los mayores valores de resistencia a la compresión fue T11028D, razón por la cual esta relación es la base de cálculo para realizar la radiación gamma a las probetas. Considerando que la segunda probeta tiene material de refuerzo en un 10%.

Para los concretos sin irradiar se observa que conforme aumenta el porcentaje de partículas de Tetra Pak Brik Aseptic los valores de resistencia a la compresión disminuyen gradualmente. Se llega a tener una disminución de hasta el 50% respecto al concreto sin laminillas. En caso contrario la resistencia aumenta conforme aumenta el tiempo de curado; se observa que el incremento de 7 a 28 días es en promedio del 30%.

La forma en la cual va cambiando la resistencia a la compresión conforme se incrementa el porcentaje de partículas de Tetra Pak se puede observar en las Figuras 3.7. Donde se observa que conforme aumenta el porcentaje de Tetra Pak Brik Aseptic la resistencia disminuye.

Cuando la mezcla de las probetas testigo se adiciona con el refuerzo, que en este caso son partículas de Tetra Pak Brik Aseptic, predomina una mayor interacción entre ambas partes produciendo la unión física. Para este tipo de concreto la interfase Testigo–Tetra Pak Brik Aseptic es débil, debido a que el Tetra Pak presenta baja adhesión y poca afinidad entre los componentes del material con el gel coloidal amorfo (gel C-S-H) e hidróxido cálcico cristalino formado.

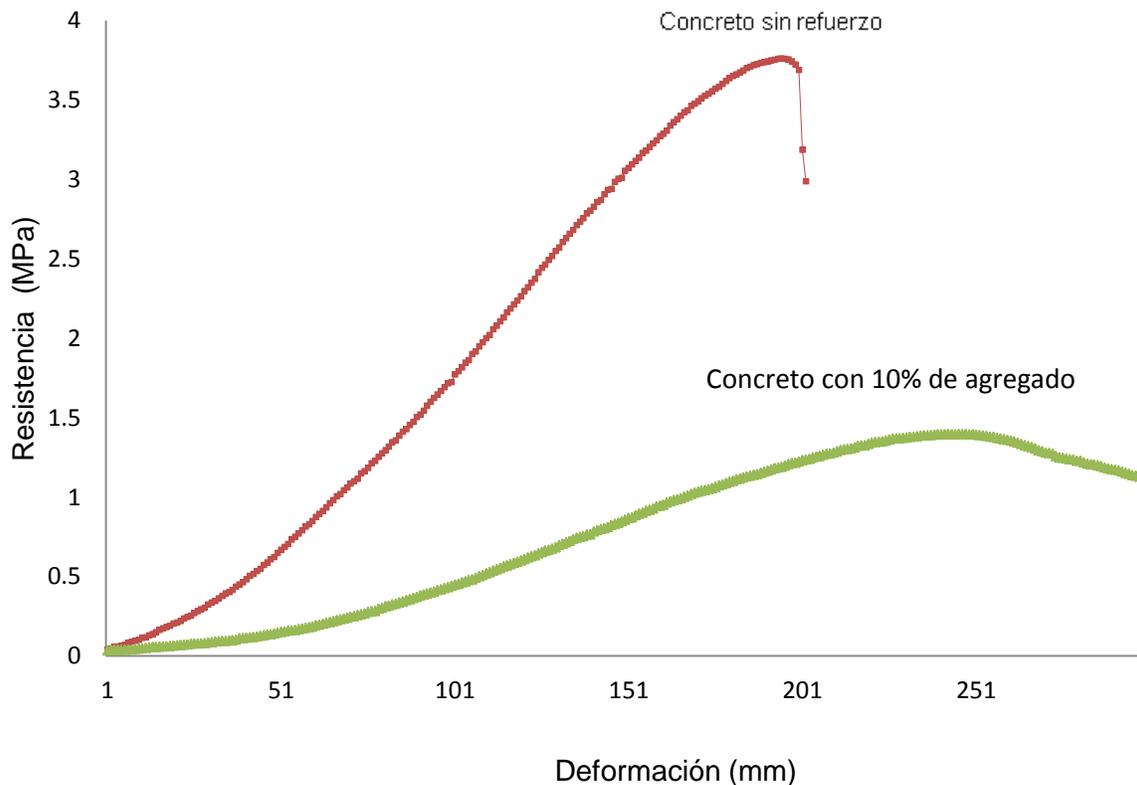
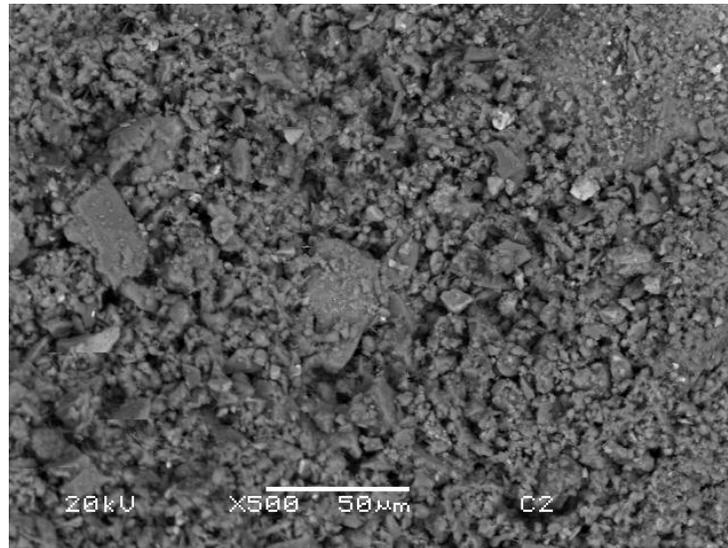


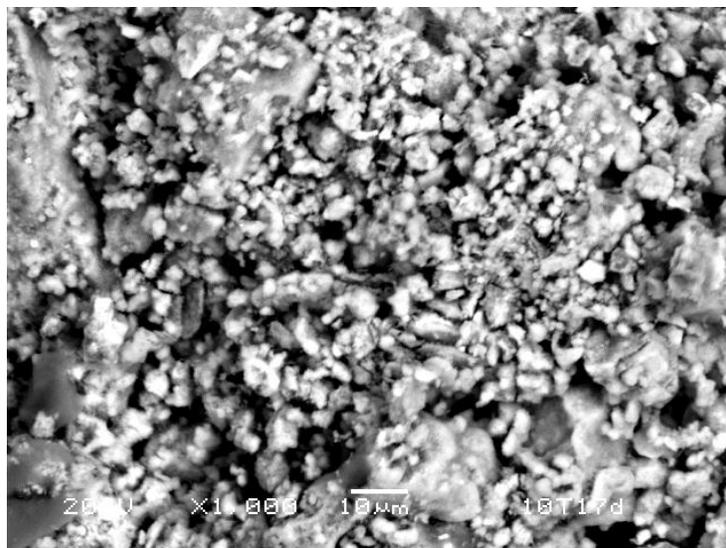
Figura 3.7 Resistencia vs Deformación de concreto: sin refuerzo; y reforzado con 10%

Los valores de resistencia a la compresión disminuyen gradualmente conforme se incrementa el porcentaje de partículas de Tetra Pak Brik Aseptic.

Como se observa en las imágenes de SEM por sus siglas en ingles) de la Figura 3.8a, la superficie de los concretos testigos (sin partículas) es uniforme, con partículas de agregado fino (arena) menores a $50\ \mu\text{m}$. Superficie que cambia cuando se agregan las laminillas, las cuales presentan una forma corrugada (Figura 3.8b). Donde la pasta de las probetas testigo debe llenar los poros que existen y de esta manera la rugosidad de la superficie del material de refuerzo contribuye a la resistencia de la unión solamente si la pasta Testigo aun líquida puede humedecer a la superficie del Tetra Pak Brik Aseptic.



a)



b)

Figura 3.8 Imágenes SEM de concreto: a) sin laminillas y b) con 10% de laminillas de Tetra Pak.

c) Concreto con Tetra Pak Brik Aseptic Irradiado

Dado que los mayores valores de resistencia a la compresión para concreto sin irradiar se obtuvieron con el 10% de partículas; se decidió trabajar sólo con este porcentaje para los concretos irradiados. Por tal motivo, el concreto con laminillas de Tetra Pak Brik Aseptic fue irradiado con rayos gamma a una dosis (200kGy), como se observa en la Tabla 3.13

Tabla 3.13 Condiciones para las probetas de concreto con partículas irradiadas

Tetra Pak (%)	Tiempo de curado (días)	Irradiado (kGy)
10	28	200

Para los concretos irradiados se observa que conforme aumenta la dosis de radiación los valores de resistencia disminuyen; llegando a ser hasta de 59% respecto del concreto sin irradiar (concretos irradiados a 300 kGy). Este fenómeno se debe principalmente al efecto de la radiación en el Tetra Pak (polietileno + aluminio), las cuales se degradan y contribuyen al debilitamiento de la interfase concreto – Tetra Pak, y como consecuencia la disminución de la resistencia mecánica.

Por otro lado, se observa que la resistencia a la compresión aumenta conforme se incrementa el tiempo de curado, esto obedece a que durante las reacciones de hidratación los silicatos cálcicos promueven la interacción del Tetra Pak con el concreto logrando un endurecimiento homogéneo favoreciendo esta propiedad mecánica.

Los mayores valores se logran para concretos irradiados a 28 días, razón por la cual en la Figura 3.9 se muestran las curvas de resistencia vs deformación para estos concretos. La resistencia a la compresión disminuye considerablemente cuando se va incrementando la dosis de radiación, hasta llegar a un valor de 8.9 MPa. Los valores de los concretos irradiados son menores que los de concretos sin irradiar, por debajo de los 22.7 MPa.

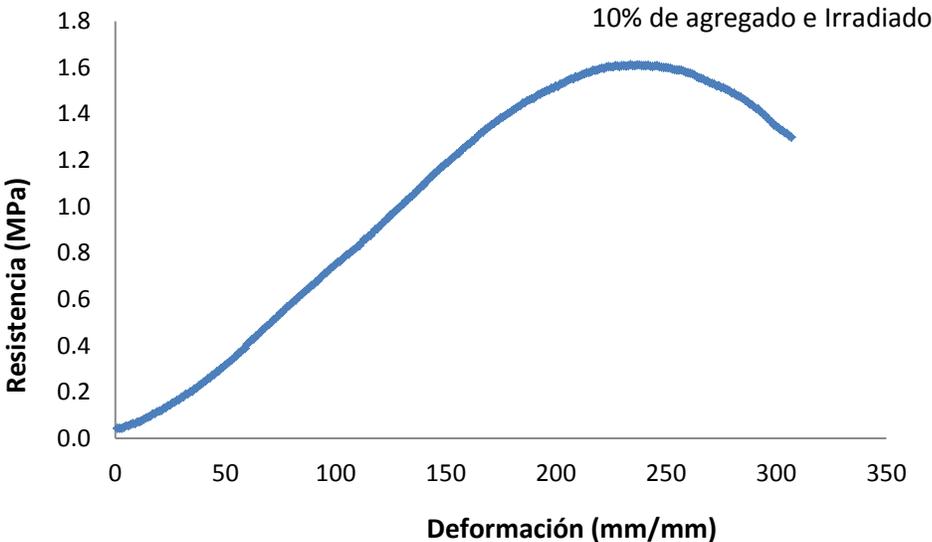


Figura 3.9 Resistencia vs Deformación de concreto con Tetra Pak Brik Aseptic curado a 28 días e Irradiado.

3.2.3 Deformación en el máximo esfuerzo

a) Concreto con Tetra Pak Brik Aseptic sin irradiar

La deformación del concreto se evaluó en probetas de 7, 14 y 28 días de curado. Los resultados se muestran en la (Tabla 3.14)

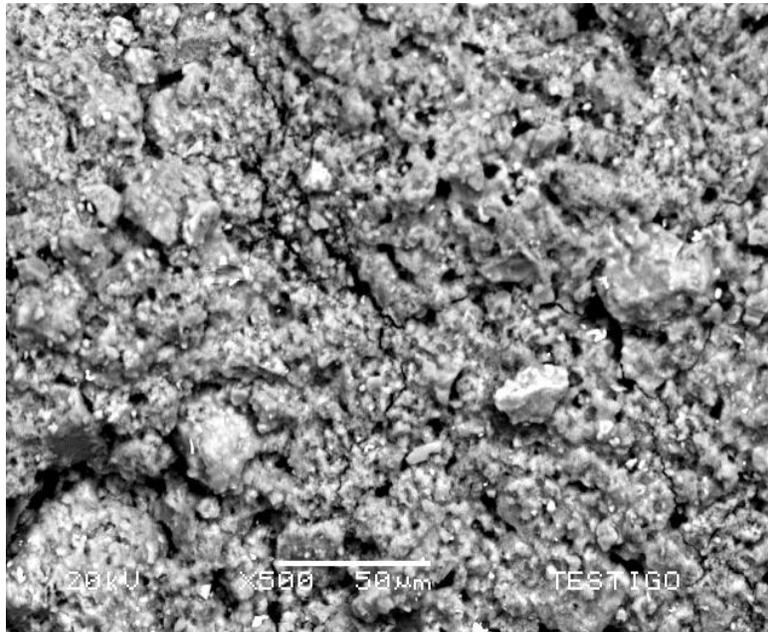
Tabla 3.14 Deformación en el máximo esfuerzo de concreto con partículas sin irradiar

Tetra Pak (%)	Tiempo de curado (días)	Deformación en el máximo esfuerzo (mm/mm)
0	7	0.0085
	14	0.0091
	28	0.0094
10	7	0.0084
	14	0.0079
	28	0.0064
20	7	0.0083
	14	0.0059
	28	0.0045
30	7	0.0062
	14	0.0053
	28	0.0045

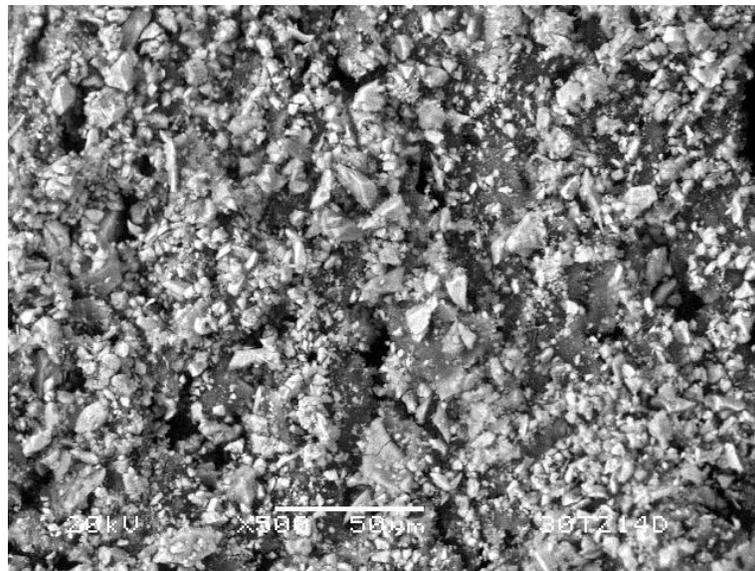
En esta Tabla se observa un comportamiento general: los valores de deformación disminuyen conforme se incrementa ya sea el porcentaje de Tetra Pak Brik Aseptic agregado o el tiempo de curado. El porcentaje de disminución llega a ser de hasta un 49%. Es decir, una mayor cantidad de partículas hacen que el concreto se deforme menos.

Este cambio en la deformación puede ser observado en la Figura 3.10, en donde se aprecia una mayor cantidad de Tetra Pak lo cual provoca mayor separación

entre los componentes del concreto y como consecuencia disminución en la deformación.



a)



b)

Figura 3.10 Imagen SEM de concreto: a) sin laminillas y b) con 30% de laminillas de Tetra Pak.

b) Concreto con Tetra Pak Brik Aseptic Irradiado

Un comportamiento similar se aprecia para los concretos irradiados, en los cuales la deformación disminuye, siendo menor para concretos con 28 días de curado. Esto contribuye a que el concreto se endurezca más y por lo tanto se deforme menos. Tal fenómeno sucede porque a mayor dosis de radiación existe una ruptura de enlaces y predomina la degradación de componentes en este material; la irradiación gamma promueve reticulación simultáneamente con la escisión y la estructura cristalina de la partícula de Tetra Pak Brik Aseptic es afectada por el tamaño de las moléculas, promoviendo mayor rigidez. (Tabla 3.15)

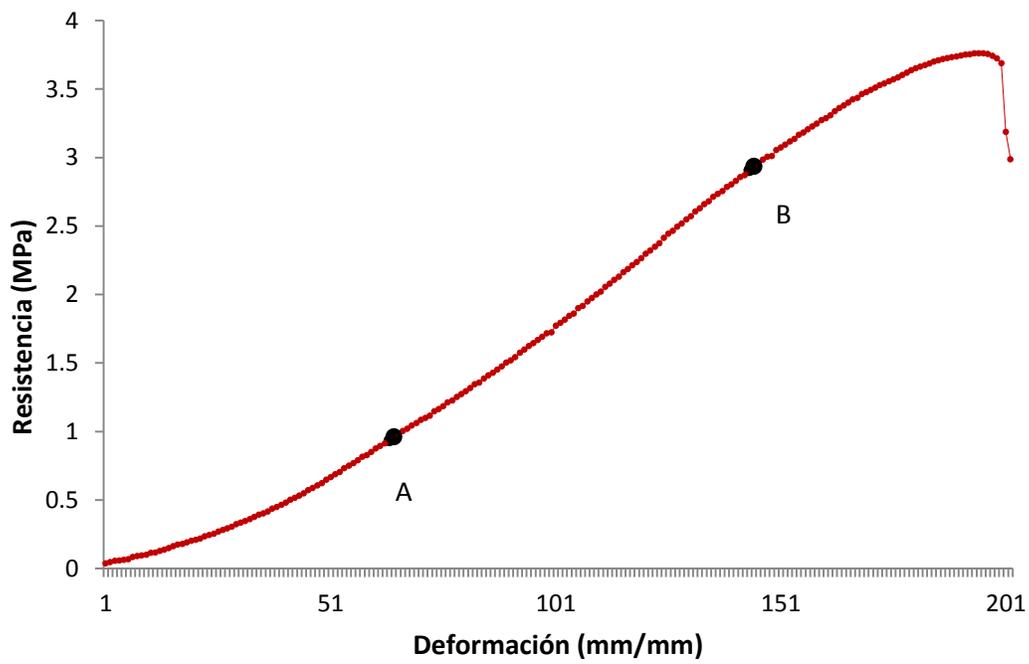
Tabla 3.15 Deformación en el máximo esfuerzo de concreto con Tetra Pak Irradiado

Tetra Pak (%)	Tiempo de curado (días)	Deformación en el máximo esfuerzo Irradiado (kGy) 200
10	7	0.0093
	14	0.0074
	28	0.0065

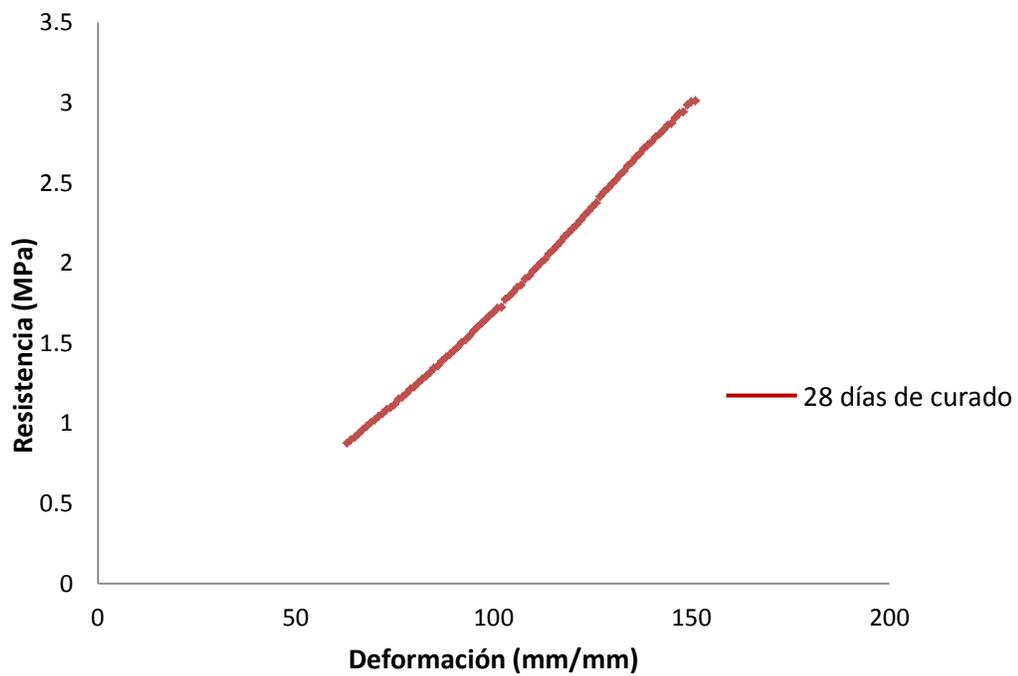
3.2.4 Módulo de Young

a) Concreto con Tetra Pak Brik Aseptic sin irradiar

El módulo de elasticidad en el concreto se calcula en base a la relación del esfuerzo aplicado y la deformación unitaria en el régimen elástico de la curva esfuerzo-deformación. En la Figura 3.11a se muestra para el concreto sin refuerzo la curva esfuerzo-deformación al valor que dio el mayor valor de resistencia a la compresión, y en la Figura 3.11b la recta pendiente de donde se calcula el módulo de Young, una vez definidos dos puntos (A y B).



a)



b)

Figura 3.11: a) Esfuerzo-deformación unitaria, y b) Módulo de Young de concreto con refuerzo sin irradiar.

En la Tabla 3.16 se resumen los resultados obtenidos del esfuerzo máximo soportado (σ), deformación en el punto de máximo esfuerzo (ε) y el Módulo de Young (E) del concreto sin refuerzo a 7, 14 y 28 días de curado.

Tabla 3.16 Esfuerzo máximo, deformación y módulo de Young de los concretos sin refuerzo

Tipo	Esfuerzo (σ) (MPa)	Deformación (ε) (mm/mm)	Modulo Young (E) (GPa)
7D	11.3±0.35	0.0080	1.35
14D	19.0±0.15	0.0091	2.02
28D	22.1±0.45	0.0094	2.91

Como se puede observar el concreto a los 28 días presenta los mayores valores de esfuerzo (22.1 MPa), deformación (0.0094mm/mm) y de Módulo de Young (2.91GPa). A partir de este Tipo de concreto 28D (28 días de curado) se uso como referencia para adicionarle los distintos tamaños y porcentajes a las probetas de concreto reforzado con partículas de Tetra Pak Brik Aseptic.

Otro parámetro indispensable en la caracterización de los concretos reforzados es el módulo de elasticidad. En la Tabla 3.17 se muestran los resultados para concretos con partículas sin irradiar.

Tabla 3.17 Módulo de Young de concreto con partículas de Tetra Pak Brik Aseptico

Tetra Pak (%)	Tiempo de curado (días)	Módulo de Young (GPa)
0	7	1.85
	14	1.97
	28	2.86
10	7	1.15
	14	1.56
	28	2.32
20	7	0.87
	14	1.33
	28	2.35
30	7	0.85
	14	1.02
	28	1.11

Para los concretos sin irradiar se observan dos fenómenos interesantes: a) los valores del módulo de Young disminuyen conforme se incrementa el porcentaje de laminillas, llegando a tener un valor de 1.11 GPa (concreto con 30% de laminillas y 28 días de curado), que es 46% menor que el de concreto sin laminillas; b) un comportamiento diferente se presenta respecto al tiempo de curado, los valores se incrementan conforme este va de 7 a 28 días.

La disminución en el módulo de Young se debe en parte al efecto que provocan las laminillas de Tetra Pak en el concreto; es decir actúan como un soporte entre los agregados del concreto y la pasta cementante, y posibilitan que este sea más flexible. De acuerdo a la literatura se menciona que las propiedades elásticas del concreto están relacionadas con las características de la zona de interfase entre los agregados minerales y la pasta cementante que la rodea. En nuestro caso los agregados gruesos constituyen la mayor fracción en la mezcla de concreto, y su grado de rigidez influye notoriamente en los módulos elásticos.

El mayor grado de elasticidad se logra a los 28 días, razón por la cual en la figura 3.12 se muestran las regiones lineales de las cuales se calcularon los módulos de Young.

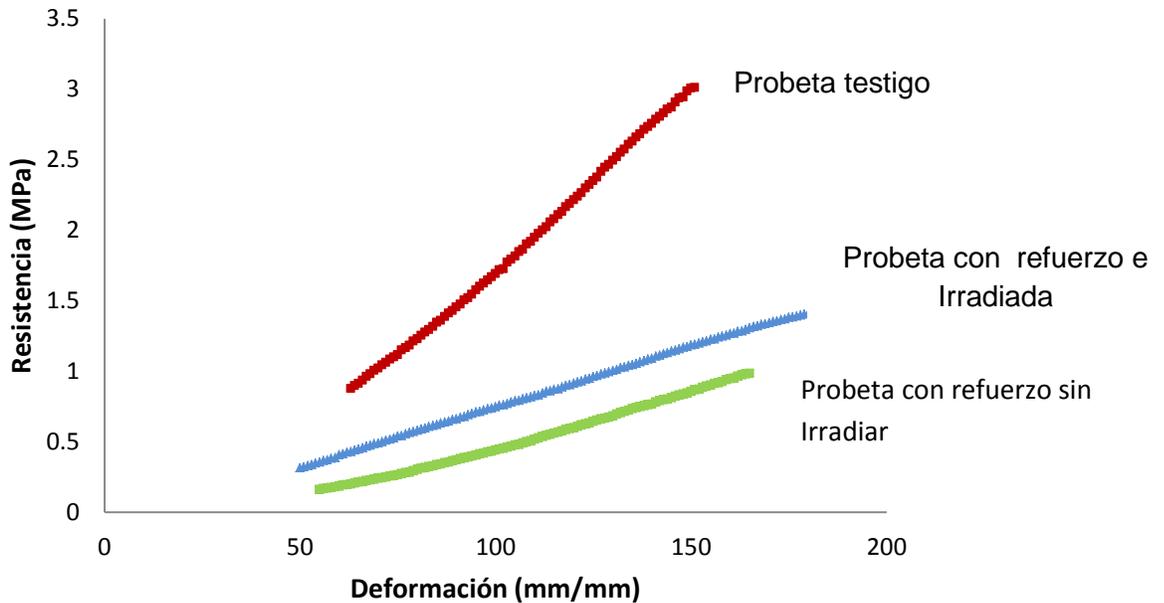


Figura 3.12 Módulo de Young de concreto con laminillas de Tetra Pak a 28 días de curado.

b) Concreto con Tetra Pak Brik Aseptic Irradiado

El módulo de elasticidad para los concretos irradiados sigue el mismo comportamiento: disminuye conforme se incrementa la dosis de radiación (Tabla 3.17); llegando a ser 32% menor que el de concreto sin laminillas. Es decir, el concreto es más dúctil, no tan rígido como el concreto sin laminillas.

Tabla 3.17 Módulo de Young de concreto con partículas irradiados

Laminillas de Tetra Pak (%)	Tiempo de curado (días)	Módulo de Young (GPa) Irradiado (kGy) 200
10	7	1.12
	14	1.53
	28	1.83

En la Figura 3.13 se muestran la línea recta para la dosis de radiación de concreto con laminillas curado a 28 días. Se observa también que el material más elástico es el que se irradia con 200 KGy, con esto se justifica que la radiación en los componentes de la partícula de Tetra Pak actúe como medio para lograr el entrecruzamiento de cadenas moleculares en mayor proporción que la degradación.

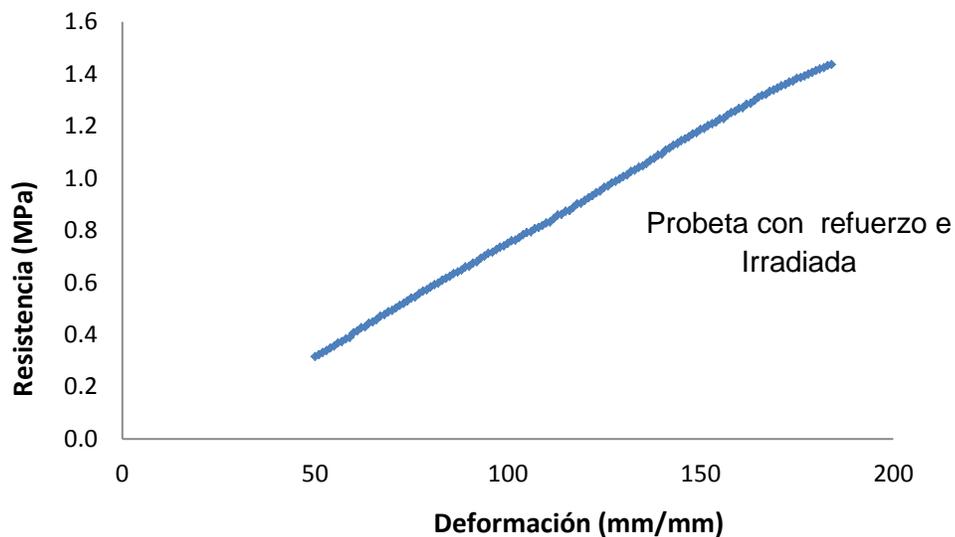
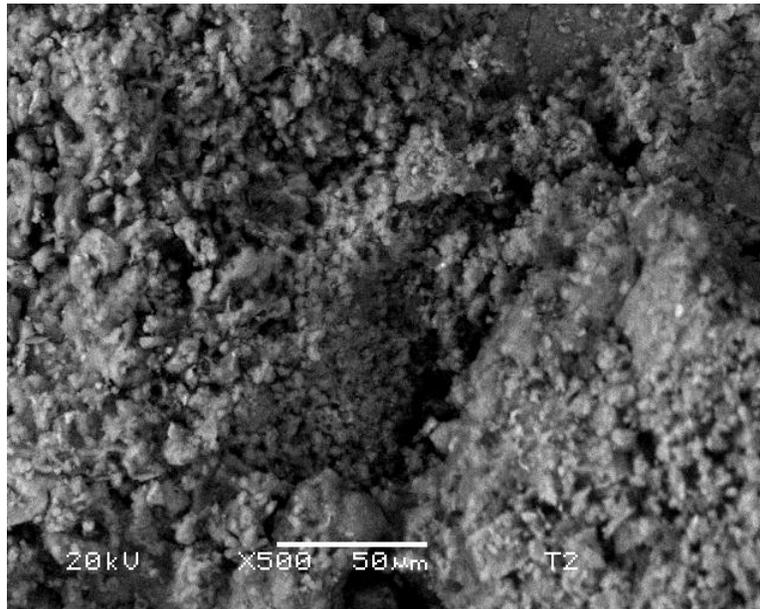


Figura 3.13 Módulo de Young de concreto con laminillas de Tetra Pak Irradiado.

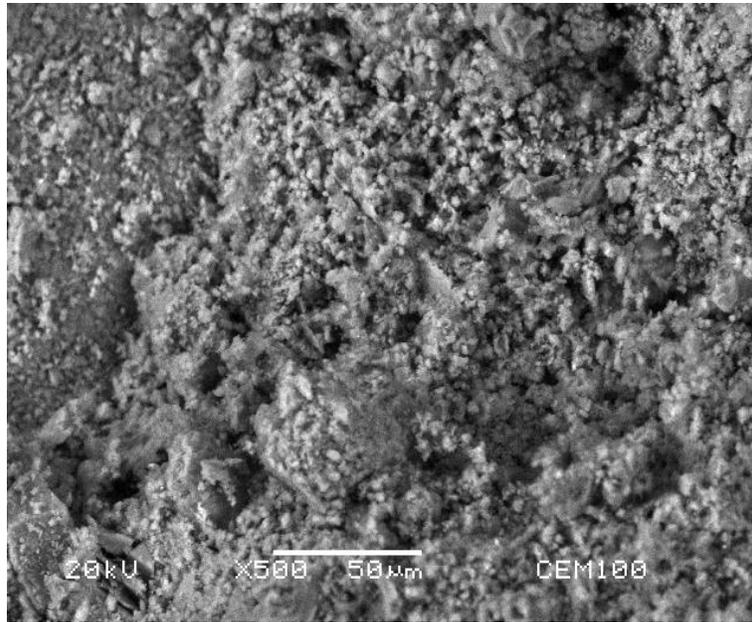
3.2.5 Análisis comparativo entre concretos sin irradiar e irradiados

Las probetas testigo de concreto sin irradiar mostraron valores más altos en resistencia a la compresión que los concretos con Tetra Pak Brik Aseptice irradiados.

Para concretos irradiados con 10% de refuerzo, los valores disminuyen progresivamente cuando se utilizan laminillas, pero aumentan cuando el porcentaje de dichas partículas de Tetra Pak Brik Aseptice disminuyen. La disminución se debe a que la radiación gamma promueve la separación entre las laminillas y el concreto, generando fisuras que hacen disminuir la resistencia. (Ver figura 3.14).



a)



b)

Figura 3.14 Efecto de la radiación gamma en el concreto reforzado con: a) Partículas de Tetra Pak Brik Aseptic y b) Concreto Testigo

En la figura 3.16a se puede apreciar que el incremento de fisuras en el concreto con laminillas es más notable con la radiación, ocasionando una disminución de su resistencia a la compresión, caso contrario a lo que sucede con la figura 3.16b, en donde se observa mayor uniformidad entre los componentes y ausencia de grietas, favoreciendo el incremento de sus propiedades mecánicas.

Respecto a la deformación en el máximo esfuerzo los concretos sin irradiar con el refuerzo del Tetra ak Brik Aseptic muestran valores similares que los concretos con laminillas e irradiados.

Para el módulo de Young se tiene que los concretos sin irradiar y con el 10% de Tetra Pak Brik Aseptic presentan un valor de 19% menor comparado con las probetas testigo. Mientras que para los concretos irradiados y con 10 % de Tetra Pak Brik Aseptic su módulo de Young aumenta un 10% con respecto a los valores

obtenidos de las probetas con Tetra Pak y sin irradiar. Esto se debe a que a partir de las dosis de radiación de 250 kGy en adelante los componentes del Tetra Pak Brik Aseptic comienzan a sufrir degradación como anteriormente se ha mencionado.

CONCLUSIONES

Durante la investigación se pueden concluir los siguientes aspectos:

Durante la investigación se encontró que después de dosis mayores de 250 kGys el Tetra Pak Brik Aseptic se empieza a degradar, por tal motivo se decidió realizar las pruebas a una dosis de 200kGys.

El agregado grueso utilizado para las probetas se uso una malla de 3/8 para obtener un mineral de la misma granulometría.

El agregado fino que fue la arena sílice fue clasificado por una malla No. 100 para tener una granulometría constante.

El concreto de las probetas testigo mantuvo los valores más altos referentes a las pruebas de resistencia a la compresión y al módulo de Young.

Las probetas con el Tetra Pak Brik Aseptic sin ser irradiadas presentas los valores por debajo de la media a los valores obtenidos en comparación al concreto de las probetas testigo.

Más sin embargo al agregar el Tetra Pak Brik Aseptic e irradiar las probetas se observó que los valores de resistencia a la compresión y el módulo de Young aumenta poco más de la mitad de los datos obtenidos para las probetas testigo.

Entonces, se concluye que al adicionar Tetra Pak Brik Aseptic e irradiando el concreto sí aumenta la resistencia a la compresión y el módulo de Young en comparación al concreto con agregado y sin irradiar.

ANEXOS

A1 Técnicas de caracterización de materiales

A1.1 Microscopia electrónica de barrido

El microscopio electrónico de barrido es un método eficaz para el estudio de la morfología de las superficies. La imagen obtenida por esta técnica se genera por la interacción de un haz de electrones que "barre" un área determinada sobre la superficie de la muestra.

La parte principal de un microscopio electrónico de barrido es la columna de electrones la cual lleva alojados en su interior:

- ♦ Un cañón de electrones que consta de un filamento que actúa como la fuente emisora.
- ♦ Un sistema de lentes electromagnéticas encargado de focalizar y reducir a un diámetro muy pequeño el haz de electrones producido por el filamento.
- ♦ Un sistema de barrido que hace recorrer el haz de electrones ya focalizado por la superficie de la muestra.
- ♦ Uno o varios sistemas de detección que permiten captar el resultado de la interacción del haz de electrones con la muestra y transformarlo en una señal eléctrica.
- ♦ Una salida conectada a una o varias bombas que producen el vacío necesario para que el conjunto funcione adecuadamente(Figura 3.5).

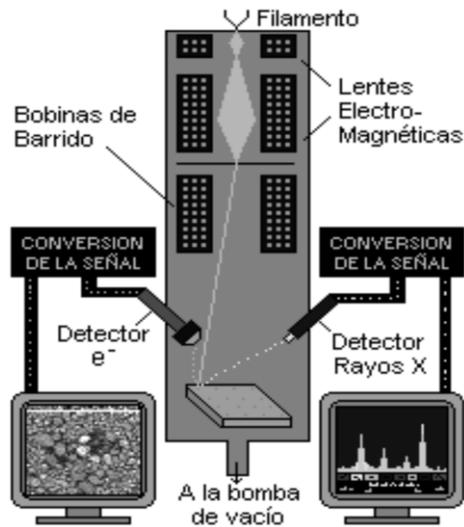


Figura 1. Esquema de los componentes de un microscopio electrónico de barrido.

La técnica esencialmente consiste en hacer incidir en la muestra un haz de electrones. Este bombardeo de electrones provoca la generación de diferentes señales que, captadas con detectores adecuados, nos proporcionan información morfológica sobre la superficie de la muestra: tamaño, textura, fractura y fallas, etc.

La señal de electrones secundarios proporciona una imagen de la morfología superficial de la muestra. La señal de electrones retro-dispersados una imagen cualitativa de zonas con distinto número atómico medio, y la señal de rayos X espectros e imágenes acerca de la composición de elementos químicos en la muestra.

Con la microscopía electrónica de barrido (SEM) se pueden obtener imágenes de la superficies del concreto, el contenido de los agregados, así como de las fracturas del mismo. La Figura 3.6 muestra un ejemplo de la superficie de concreto vista por SEM.

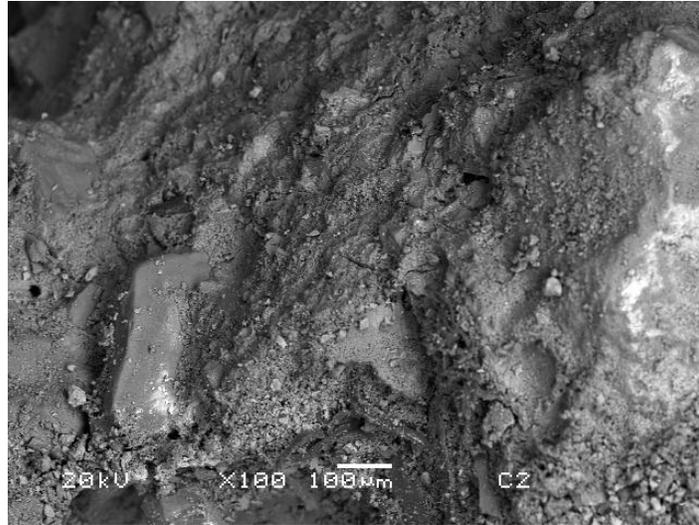


Figura 2. Imagen del concreto en el SEM

REFERENCIAS

ACI, 2009, "American Concrete Institute". Guide for the use of polymers in concrete". Report on polymer-modified concrete, pp.548.

Aguiar, H., 1998, "Métodos de ensayo no destructivos", Instituto Nacional de Tecnología Aeroespacial. Madrid 4ª. Edición, pp. 98

Aguiar, H., 1998, "Métodos de ensayo no destructivos", Instituto Nacional de Tecnología Aeroespacial. Madrid 4ª. Edición, pp. 99

Aguiar, H., 1998, "Métodos de ensayo no destructivos", Instituto Nacional de Tecnología Aeroespacial. Madrid 4ª. Edición, pp. 100

Alatorre, J., Uribe, R., 1998, "Agregados para concreto: cada cual por su nombre". Rev. Construcción y tecnología en México, pp. 13,14.

Alcántara, H., 2013, "Incremento de consumo de Tetra Pak".

Antioquia, Oct. 2014, Anuario Estadístico de Antioquia. Servicios Públicos. Disponible en: <http://planeacion.antioquia.gov.co/anuario2004/anuario2004/servicios/i-servicios.htm>

Askeland, 1998, "Ciencia ingeniería de los materiales". Ed. Thompson 3ª, México, pp. 215- 220.

Bermejo, R., 2012, "La gran transición hacia la sostenibilidad". Ed. Catarata, pp. 227.

CANACEM, Oct. 2013, "Cámara Nacional del Cemento". Disponible en: www.canacem.org.mx

CANACEM, Sep. 2013, "Cámara Nacional del Cemento". Disponible en: www.canacem.org.mx

CEMPRE, Nov 2012, Comercio Empresarial para el Reciclaje, "Envase de larga vida". Disponible en: www.cempre.org

Charlesby, A., 2007, "Crosslinking of polytheneby pile radiation", Vol. 215, pp. 187-214.

Cleland, M., 2003, "Medium and high energy electron beam radiation processing equipment for comercial application", pp. 74-89.

DOF, 2011, "Diario Oficial de la Federación". Disponible en: www.dof.gob.mx

Dole, M., 2006, "Chemistry and physics of radiationdosimetry". Report of symposium IX, ArmyChemical Center, Maryland.

Eisberg, L., 1993, "Física, fundamentos y aplicaciones". Ed. Mc Graw Hill, pp. 174-178.

Falcinelli, O., 2002, "Mecánica de materiales avanzados". Maestría aeroespacial, recinto universitario de Mayagüez. Universidad de Puerto Rico.

Feynman, L., 1971, "Mecánica, radiación y calor". Ed. Fondo educativo interamericano, pp. 163-171.

Galindo, G., 2007, "Efecto de la radiación gamma en concreto elaborado con arena sílice, resina poliéster y fibras de polipropileno". Tesis de Ingeniería Química de la Universidad Autónoma del Estado de México.

González, C., 2011, "XIX Congreso Internacional Ambiental CONIECO", pp.18.

González, G., 2004, "Propuesta de 3 materiales de apoyo para la enseñanza de la

teoría del envase en México”. Tesis de Licenciatura Universidad Autónoma del Estado de México, pp. 47.

Imcyc, 2006, “Pruebas de resistencia a la compresión del concreto”, pp. 21.

Kalpaakjian, S., 2002, “Manufactura, ingeniería y tecnología”. Ed. Prentice Hall, pp. 157.

Martínez, G., 2006, “Concrete reinforcedwithirradiated nylon fibers”, pp. 484-491.

Martínez, G., 2009, “Uso de las fibras poliméricas en el mejoramiento de las propiedades mecánicas del concreto”. Universidad Autónoma del Estado de México, pp. 125-169.

Martínez-Barrera, G. and Brostow, W., 2009, “Fiber-reinforcedpolymer concrete: propertyimprovementby gamma irradiation”. En: gamma radiationeffectsonpolymericmaterials and itsapplications. Researchsignpost, Kerala India. Pp. 27-44.

(Martínez-Barrera, G., Viguera-Santiago, E., Hernández-López, S., Menchaca-Campos, C., Brostow. W, 2005), “Mechanicalimprovement of concrete byirradiatedpolypropylenefibers”. Polym. Eng. Sci. 21, pp. 1426-1431.

(Mehta, K., 2007), “Concreto, estructura, propiedades y materiales”. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A. C., pp. 1,2.

Melissinos, A., 1995, “Rhysicsforscientist and engineers. W. B. Saunders& Co”, pp. 187-190.

Melvin, K., 1998, “Prestressed concrete: design”. London Champman and half, pp. 148-150.

Muciño, R., 2007, "Concretos que contienen polímeros". Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México, pp. 136-139.

Nawy, E., 1995, "Prestressed concrete: a fundamental approach". EnglewoodCliffs, New Jersey. Ed. Prentice Hall, pp. 119-121.

Noris, R., 2003 "TheChemical Process Industries". Ed. Mc Graw Hill, pp.54.

ONNCCE, 2011), "Organización Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación". Disponible en: www.onncce.org.mx

Osorio, S., 2007, "Comportamiento mecánico del concreto reforzado con fibras de bagazo de caña de azúcar". Ed. Dyna, pp. 69-79.

Primo, E., 1996, "Química orgánica básica y aplicada de la molécula a la industria". Vol1. Ed. Reverte, pp. 174.

Publicaciones Vértice, S. L., 2012, "Gestión ambiental: manipulación de residuos y productos químicos". Tratamientos plásticos y tetrabrik. Ed. Vértice, pp. 102-104.

Ramachandran, 1999, "Concrete admixtureshandbook: properties, science and technology". Ed. NoyesPublications, USA. Pp. 27-29.

Román, A., 2012, "Experiencias en el reciclado", pp. 2.

Romero, M., 2002, "Resistencia de materiales". Ed. Universitat Jaume, pp. 234.

Sears, F., 1997, "Física universitaria". Ed. Fondo educativo interamericano, pp. 148-152.

Steven, R., 2002, "Manufactura, ingeniería y tecnología". Ed. Rose Kerman, pp. 61.

Tamayo, J., 2004, "Industria de la construcción, agregados para el concreto hidráulico, especificaciones y métodos de prueba". Diario Oficial de la Federación, pp. 2-4.

Tawfik, M., 2006, "Polymer concrete from marble waste and recycled poly (ethyleneterephthalate)". Journal of elastomers and plastics, pp. 65-79.

Taylor, H., 1997, "Cement Chemistry". Ed. Technik GmbH 2ª, pp. 456,457.

Taylor, H., 2004, "La química de los cementos". Ed. URMO, pp. 12-15.

Tetra Pak, Sep. 2012, Disponible en: www.concienciaambiental.com.mx

Tetra Pak, Sep. 2013, Disponible en: www.tetrapak.com

Turrado, J., 2011, "Envases de cartón para líquidos como fuente de fibra secundaria", pp. 62.

Villegas, J., 2011, "Reciclado de Tetra Pak", pp.1.

William, G., 1996, "Química". Ed. Tim Buzik, pp. 525.

Ávila. et. al; 2013, "Effects on Mechanical Properties of Recycled PET in Cement-Based Composites", pp. 2-5.