

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL  
FACULTAD REGIONAL CÓRDOBA**

**TESIS DE DOCTORADO EN INGENIERÍA – MENCIÓN MATERIALES**

**FABRICACIÓN DE COMPONENTES CONSTRUCTIVOS CON LA  
FRACCIÓN PLÁSTICA DE LOS RESIDUOS PROVENIENTES DEL  
RECICLADO DE RAEE**

**Autora:**

D.I Melina Gabriela Gómez

**Director:**

Dr. Jerónimo Rafael Kreiker

**Co-directores:**

Dra. Bárbara Belén Raggiotti

Dr. Lucas Ernesto Peisino

Para optar por el título de:  
Doctora en Ingeniería, mención Materiales  
Carrera reconocida por el Ministerio de Educación de la Nación Argentina.  
Res. 2018-1228-APN-ME  
Carrera acreditada por CONEAU RESFC-573/16

Córdoba, junio de 2023

*A Feliciano*

## Agradecimientos

Esta tesis no hubiese sido posible sin la ayuda y el apoyo de un gran número de personas e instituciones; por eso quisiera agradecer:

A CONICET por otorgarme la beca doctoral.

A la Universidad Tecnológica Nacional por admitirme al doctorado.

Al CEVE por abrirme sus puertas y ser mi lugar de trabajo durante los primeros años.

Al INFAP por recibirme y ser mi lugar de trabajo al finalizar la tesis.

A la Universidad de Granada por permitirme realizar una estancia de investigación.

A mi director de tesis; Jerónimo Kreiker, por todo lo aprendido, por su acompañamiento en este camino, su entrega, generosidad, confianza, apoyo y tiempo.

A mis co-directores:

Lucas Peisino por ser un gran maestro; su paciencia infinita, entrega y amistad.

A Belén Raggiotti por su palabra justa en cada momento, apoyo y amistad.

A Ariel Ochoa, por recibirme y hacerme sentir cómoda desde el primer momento, por entender, acompañar y transmitir conocimiento.

A Mónica López Alonso, Gloria Cuenca Moyano y Francisco Agrela Sainz, por su disposición, tiempo, confianza y comprensión durante mi estancia en la Universidad de Granada.

A mi esposo Cristian, por acompañarme incondicionalmente en la vida y particularmente en este camino, en el que, frente a mis ausencias, su presencia y disposición fueron claves para nuestra familia.

A mi hermana Mariana, por ser inspiración, creer en mí, por estar y darme fuerzas desde siempre.

A mis padres por inculcarme y asegurarme una educación de calidad. Por apoyarme en todo momento.

A mi familia, a mis primas y a mis amigas por escuchar, aceptar, esperar y recibirme siempre con alegría.

A mis compañeros y directivos del CEVE de quienes, con mucho cariño guardo hermosos recuerdos de oficina, laboratorio, charlas y mates.

A mis compañeros del INFAP; por estar, apoyarme y ayudarme en el día a día. Por tantos momentos lindos de trabajo entre charlas, risas y anécdotas.

Estaré agradecida a todos, siempre.

## Resumen

Hoy en día, la problemática de los residuos genera gran preocupación y sobre todo requiere de acciones desde distintos ámbitos. Los residuos han provocado daños irreversibles en el ambiente que impactan directamente en las personas y demás seres vivos. Calentamiento global, incremento del diámetro del agujero en la capa de ozono, sequías, incendios forestales, derretimiento de los glaciares son algunas de las problemáticas que escuchamos casi a diario.

Uno de los residuos que más daño genera y que más se ha incrementado en las últimas décadas es el de los provenientes de los Aparatos Eléctricos y Electrónicos o bien, RAEEs. Esta corriente de residuos presenta contaminantes que, en contacto con la tierra o el agua se trasladan hasta llegar al contacto con seres vivos y causando graves problemas de salud.

En esta tesis se hace hincapié en la fracción plástica de los RAEEs (FPR). La FPR se forma por las carcasas de plástico que se desprenden del residuo y que son muy difíciles de reciclar, reusar o reinsertar en un proceso productivo debido a que se encuentran contaminadas con metales pesados o retardantes de llama bromados, producto de haber estado durante su vida útil en contacto con el aparato. El resto del aparato, es decir toda su parte electrónica interna, hoy en día ha encontrado su corriente de reciclado en la minería urbana y re uso de partes con buen funcionamiento.

El objetivo de este estudio es lograr un reciclado seguro y eficiente de esta FPR para evitar así su desperdicio y lograr inserción en un ciclo productivo, el de la construcción. Se desarrolló un sistema que permite encapsular la partícula para retener químicamente en su matriz los contaminantes y con este se desarrolló un agregado para morteros que a la vez presenta una forma de producción sencilla y económica que puede ser llevada a cabo sin conocimientos técnicos específicos, grandes inversiones de capital o necesidad de infraestructura compleja o de gran porte.

En virtud de lo investigado, es posible neutralizar los contaminantes tanto metálicos como orgánicos mediante un sistema sencillo de encapsulado con cemento y aditivos. Con este procedimiento se logra generar un agregado apto para morteros y construcciones en general que presenta propiedades mecánicas aptas para tal fin.

Finalmente se desarrollan propuestas de componentes constructivos y su respectivo proceso de producción y un análisis de ciclo de vida que permitió determinar su elegibilidad frente a otras alternativas.

## Abstract

Nowadays, the problem of waste generates great concern and above all requires actions from different areas. The waste has caused irreversible damage to the environment that directly impacts people and other living beings. Global warming, increasing the diameter of the hole in the ozone layer, droughts, forest fires, melting glaciers are some of the problems we hear almost daily.

One of the wastes that generates the most damage and that has increased the most in recent decades is that of those from Electrical and Electronic Equipment or WEEEs. This stream of waste presents contaminants that, in contact with land or water, are transferred until they reach contact with living beings and causing serious health problems.

This thesis emphasizes the plastic fraction of RAEEs (FPR). The FPR is formed by the plastic housings that are detached from the waste and that are very difficult to recycle, reuse or reinsert in a production process because they are contaminated with heavy metals or brominated flame retardants, product of having been during its useful life in contact with the device. The rest of the device, that is, all its internal electronic part, today has found its current of recycling in urban mining and reuse of parts with good functioning.

The objective of this study is to achieve a safe and efficient recycling of this RPF to avoid its waste and achieve insertion in a productive cycle, that of construction. A system was developed that allows encapsulating the particle to chemically retain contaminants in its matrix and with this an aggregate for mortars was developed that at the same time presents a simple and economical form of production that can be carried out without specific technical knowledge, large capital investments or the need for complex or large infrastructure.

By virtue of the research, it is possible to neutralize both metallic and organic contaminants by means of a simple encapsulation system with cement and additives. With this procedure it is possible to generate an aggregate suitable for mortars and constructions in general that has mechanical properties suitable for this purpose.

Finally, proposals for construction components and their respective production process and a life cycle analysis are developed that allowed to determine their eligibility against other alternatives.

## Índice General

Dedicatoria	
Agradecimientos	
Resumen	
Abstract	
Índice temático	
Lista de Figuras	
Lista de Tablas	
Simbología y nomenclaturas	

## Índice Temático

### Contenido

Agradecimientos.....	3
Resumen.....	4
Abstract.....	5
Índice General.....	6
Índice Temático.....	6
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	15
1.1. Introducción.....	16
1.2. Propuesta de componente constructivo.....	17
1.3. Programa teórico experimental y metodología.....	17
1.3.1. Plan de trabajo.....	18
1.3.2. Hipótesis.....	18
1.4. Objetivos.....	18
1.4.1. Objetivo general.....	18
1.4.2. Objetivos particulares.....	19
1.5. Estructura de la tesis.....	19
CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO.....	21
2.1. Los residuos de aparatos electrónicos y electrónicos.....	22
2.2. La fracción plástica de los RAEE (FPR).....	23
2.2.1. Metales pesados.....	24
2.2.2. Retardantes de llama bromados.....	25
2.3. Daños a la salud relacionados con el manejo de RAEE.....	26
2.4. Marco legal y actuaciones gubernamentales a nivel mundial, nacional y local.....	27
2.5. Manejo de RAEE.....	28
2.6. La Sustentabilidad.....	32

2.6.1.	Los objetivos del Desarrollo Sostenible.....	32
2.6.2.	La Economía Circular .....	33
2.6.3.	La Construcción Sostenible.....	35
2.7.	El uso de desechos plásticos en la construcción .....	35
2.8.	La incorporación de RAEEs y plásticos de RAEEs en la construcción.....	42
2.9.	Estabilización por Solidificación en matriz cementicia.....	43
2.10.	Conclusiones del capítulo .....	44
CAPITULO 3.	LA FRACCIÓN PLÁSTICA DE RAEE.....	46
3.1.	Análisis bibliográfico de la FPR .....	47
3.2.	Caracterización de la FPR .....	53
3.2.1.	Caracterización Física .....	53
3.2.2.	Caracterización química (Composición polimérica) .....	57
3.2.3.	Análisis de contaminantes químicos .....	58
3.3	Conclusiones del capítulo .....	63
CAPITULO 4.	MATERIAL COMPUESTO CON MATRIZ CEMENTÍCEA Y AGREGADOS DE FPR.....	65
4.1.	Material compuesto con matriz cementicia.....	66
4.1.1.	Reglamento y normas que intervienen en el uso de agregados para hormigón .....	69
4.1.2.	Los agregados de plásticos reciclados en el hormigón.....	70
4.1.3.	Los agregados de plásticos reciclados de RAEEs en el hormigón.....	72
4.1.4.	Los agregados de plásticos reciclados de RAEEs en el hormigón – experiencia CEVE .....	74
4. 2	Conclusiones del capítulo .....	77
CAPITULO 5.	DESARROLLO DE AGREGADO DE PLASTICO RECICLADO A PARTIR DE LA FPR.....	78
5.1.	Introducción .....	79
5.2.	Materiales del APR .....	79
5.2.1.	Fracción plástica de RAEE .....	79
5.2.2.	Cemento Portland .....	80
5.2.3	Cemento de albañilería .....	81
5.2.4.	Adiciones .....	81
5.2.5.	Agua .....	82
5.3.	Metodología .....	82
5.3.1.	Estrategia para la obtención del APR .....	82
5.3.2.	Variables .....	83
5.3.3.	Procedimiento de mezclado .....	84
5.3.4.	Mezclas y dosificaciones.....	86
CAPITULO 6.	CARACTERIZACIÓN DEL APR .....	91
6.1.	Introducción .....	92

6.2.	Neutralización de contaminantes.....	93
6.2.1.	Metales pesados.....	93
6.2.2.	Neutralización de contaminantes orgánicos bromados.....	94
6.3.	Determinación de características físicas .....	103
6.3.1.	Descriptor de forma, tamaño y densidad aparente de los agregados.....	103
6.3.2.	Granulometría y módulo de finura.....	105
6.4.	Propiedades los APR en morteros cementicios.....	107
6.4.1.	Conductividad térmica.....	109
6.4.2.	Resistencia a la compresión .....	111
6.4.3.	Resistencia a la flexión.....	114
6.4.4.	Capacidad y velocidad de succión capilar.....	117
6.5	Conclusiones de capítulo.....	124
CAPITULO 7.	COMPONENTES CONSTRUCTIVOS CON APR .....	127
7.1.	Producción del APR .....	128
7.1.1.	Producción en planta piloto .....	128
7.1.2.	Etapas del proceso y maquinaria necesaria .....	129
7.1.3.	Layout de la planta de producción piloto del APR .....	132
7.2.	Componentes constructivos.....	132
7.2.1.	Ladrillos.....	133
7.2.2.	Ladrillos huecos .....	136
7.2.3.	Marco estructural para ventanas .....	136
7.3.	Vivienda prototipo.....	136
7.4	Conclusiones del capítulo.....	137
CAPITULO 8.	ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA.....	139
8.1	El análisis de Ciclo de Vida.....	140
8.1.1.	Metodología .....	141
8.1.2.	Etapas de un ACV.....	142
8.1.3	Construcción del diagrama de flujo del sistema.....	144
8.2	Análisis de Ciclo de Vida de los APR .....	148
8.2.2	Antecedentes.....	148
8.2.3	Procedimiento para la fabricación de APR .....	150
8.2.4	Definición de objetivos y alcance .....	151
8.2.5	Materiales y métodos.....	153
8.2.6	Inventario de Ciclo de Vida.....	154
8.2.7	Caracterización de impactos .....	156
8.3.	Fin de Vida .....	161

8.4.	Conclusiones del capítulo .....	163
8.5.	Futuros análisis .....	164
CAPITULO 9.	CONCLUSIONES GENERALES .....	165
9.1.	Conclusiones .....	166
9.2.	Proyecciones .....	166
Referencias .....		167

#### Lista de figuras

Figura 1. 1:	síntesis esquemática del plan de trabajo. ....	18
Figura 2. 6:	Porcentajes de composición de RAEEs [44].....	23
Figura 2. 7:	Composición del material de los desechos electrónicos [45].....	23
Figura 2. 8:	Estimación de la composición polimérica de lote de 10 t. de FPR (6).....	24
Figura 2. 9:	Fórmula química desarrollada del Tetrabromobisfenol A (TBBPA).....	26
Figura 2. 10:	Esquema del flujo de la Economía Circular [143] .....	34
Figura 2. 11:	Contenedores de basura diferenciada y trabajadores en plantas de reciclaje de residuos.....	35
Figura 2. 12:	Proceso en el cual se basan todos los proyectos del CEVE. ....	37
Figura 2. 13:	Proceso de fabricación de ladrillos de PET . ....	38
Figura 2. 14:	Ladrillo de PET tamaño convencional.....	39
Figura 2. 15:	Ladrillo de PET tipo Block. ....	39
Figura 2. 16:	Vivienda modelo construida con ladrillos de PET.....	41
Figura 2. 18:	Desarrollo de agregado sintético grueso por Alqahtani y col. [171] .....	43
Figura 3. 1:	Residuo de plásticos de RAEE. ....	47
Figura 3. 2:	Composición y distribución en masa de polímeros de la muestra representativa de fracción plástica de RAEE de Maris y col. [6].....	48
Figura 3. 3:	Composición y distribución polimérica en masa de la FP- RAEE [3].....	49
Figura 3. 4:	Composición polimérica mediante FT-IR de 45 electrodomésticos [30].....	49
Figura 3. 5:	Imágenes binarizadas tomadas con cámara digital y microscopio. ....	53
Figura 3. 6:	Histograma de distribución por áreas de FPR#3. ....	55
Figura 3. 7:	Histograma de distribución por áreas de FPR#8. ....	55
Figura 3. 8:	Distribución de tamaños de partícula por tamices según norma IRAM 1505 [183]. ....	56
Figura 3. 9:	Espectros FTIR de los polímeros que conforman la FPR, poliestireno de alto impacto (HIPS) y del acrilonitrilo butadieno estireno (ABS). ....	57
Figura 3. 10:	Composición polimérica de la muestra de FPR. ....	58
Figura 3. 11:	Extracción de TBBPA en extracción con hexano.....	59
Figura 3. 12:	Curvas de calibración para la cuantificación del TBBPA. Se utilizaron dos estándares diferentes, docosano y 9-bromo antraceno. Se presentan los cálculos para la obtención de los LOD y LOQ. ....	59
Figura 3. 13:	Cromatograma representativo de los lixiviados en agua de la FPR. El cromatograma presentado en esta figura corresponde al lixiviado de FPR#3 en agua a 100°C (FPR100, entrada 2 de la Tabla 3.3).....	61

Figura 3. 14: Señal correspondiente al retardante de llama bromado TBBPA, lixiviado en agua a partir de FPR#3. Comparativa de lixiviado de TBBPA en diferentes condiciones: 100°C en agua, FPR100 (negro); 50°C en agua, FPR50 (rosa); 25°C en solución de ácido acético. ....	61
Figura 4. 1: Muestras de diferentes tipos de agregados gruesos desarrollados por Alqahtani y Iqbal Khan et al. [154][229]. ....	73
Figura 4. 2: Muestras de partículas de FPR triturado y FPR recubierto con capas de cemento. ....	74
Figura 4. 3: Coloración amarillenta de las muestras en contacto con rayos UV. ....	76
Figura 4. 4: Equilibrio ácido-base de TBBPA. ....	77
Figura 5. 1: FPR en granulometrías 3 mm (FPR#3) y 8 mm (FPR#8). ....	80
Figura 5. 2: Sistema Core-Shell de encapsulado para solidificación/ estabilización de contaminantes. ....	83
Figura 5. 3: Materiales del APR. ....	85
Figura 5. 4: En las fotografías A y B, se muestran los APR en proceso de secado a temperatura ambiente en un ambiente cerrado y seco. En la fotografía C, se muestra el APR tamizado y separado por tamaños. ....	86
Figura 5. 5: A) APR FPR#3@MC, B) APR FPR#8@MC, C) APR FPR#3@MC:CA/MMF, D) APR FPR#8@MC:CA/MMF, D) APR FPR#3@MC:CV-1 ....	90
Figura 6. 1: Fracción de cromatograma de 42,2 a 43,2 min. Se observa la variación de la intensidad de la señal del TBBPA en función de las diferentes mezclas. ....	96
Figura 6. 2: APR de tipo FPR#3@CPF:AC sometido a una condición de EXT50 y EXT100. ....	97
Figura 6. 3: Fracción de cromatograma de extracción de FPR y FPR@CPF:CA, zona con derivados de estireno. ....	98
Figura 6. 4: Aguas de curado de muestras sin carbón activado y con carbón activado respectivamente. ....	99
Figura 6. 5: Agua de curado FPR#3 @MC: CA/MMF-1 ....	101
Figura 6. 6: Agua de curado FPR#3 @ MC: CA/CU - 1 ....	101
Figura 6. 7: Agua de curado FPR#3 @ MC: CA/061-1. ....	101
Figura 6. 8: Agua de curado FPR#3 @ MC. ....	101
Figura 6. 9: Agua de curado FPR#3@MC:CV-1 ....	101
Figura 6. 10: Agua de curado FPR#3@ MC: CV-2 ....	101
Figura 6. 11: Aguas de curado FPR#3; FPR#3@MC; FPR#3@MC:CA/CU-1; FPR#3@MC:CA/CU-4. ....	102
Figura 6. 12: Aguas de curado FPR#3@MC:CV- 4; 20 Y 30. ....	102
Figura 6. 13: Distribución por tamaño de partículas de APRs, FPR y arena gruesa en relación a los límites CIRSOC. ....	105
Figura 6. 14: Probetas de mortero con APR y FPR como agregado. ....	109
Figura 6. 15: Equipo usado para medir la conductividad térmica. Adaptación del equipo bajo la Norma IRAM 11559:1995. ....	110
Figura 6. 16: Conductividad térmica de las probetas con diferentes APR. ....	110
Figura 6. 17: Esquema de ensayo de flexión con carga en el punto medio. La tensión máxima sólo se producirá en el centro de la viga. ....	115
Figura 6. 18: Prensa y controlador para ensayo de flexión. ....	115
Figura 6. 19: Velocidad de succión capilar para las muestras mencionadas. ....	119
Figura 6. 20: Porcentajes de porosidad interna y densidad aparente de las probetas. ....	121
Figura 6. 21: Gotas de agua en la superficie de una hoja de loto de William Thielicke. ....	122
Figura 6. 22: Ensayo de ángulo de contacto. ....	123
Figura 6. 23: Cálculo de ángulo de contacto de la gota por el software image J. ....	123

Figura 7. 1: Diagrama de flujo de proceso productivo de APR.....	128
Figura 7. 2: Trituradora de discos y un molino de cuchillas. Ambas necesarias para reducir el tamaño de las carcasas plásticas a 3-4 mm. ....	130
Figura 7. 3: Mezcladora convencional utilizada en la etapa de mezclado y encapsulado. ....	130
Figura 7. 4: Partículas de APR luego del tamizado. ....	131
Figura 7. 5: Curado del APR en recipientes adecuados. ....	131
Figura 7. 6: Layout de planta piloto para la producción de APR. ....	132
Figura 7. 7: Diagrama de flujo de la producción de ladrillos con mortero de APR. ....	134
Figura 7. 8: : a - b: a- ladrillo macizo de APR. b- pallet con producción en masa del ladrillo de APR. ....	134
Figura 7. 9: Ensayo de resistencia a la compresión en ladrillos de APR. ....	135
Figura 7. 10: Pared en construcción de ladrillos de APR . ....	135
Figura 7. 11: Bloque hueco estándar hecho con APR. Figura 7. 12: ventana con marco de hormigón con agregado de APR .....	136
Figura 7. 13: Modelo vivienda prototipo fabricada con ladrillos de APR. ....	137
Figura 7. 14: Construcción de paredes dentro de la vivienda empleando diferentes técnicas y con ladrillos de APR. ....	137
Figura 8. 1: Ciclo de vida de un producto [286].....	140
Figura 8. 2: Fases del ACV en IRAM-ISO 14040 [287]. ....	142
Figura 8. 3: Diferentes formas de limitar un sistema para analizar un producto o servicio según el objeto de estudio. ....	143
Figura 8. 4: Diagrama general del ciclo de vida de fabricación y colocación de baldosa cerámica. ....	145
Figura 8. 5. Límites del sistema para la producción de FPRT .....	152
Figura 8. 6: Límites del sistema de la producción de APR. ....	153
Figura 8. 7: Diagramas de flujo de los proceso y límites del sistema para las etapas “ Producción de FPRT” y “Producción de APR” .....	153
Figura 8. 8: Incidencia de cada categoría de impacto en el proceso de fabricación de FPRT. ....	157
Figura 8. 9: Incidencia de cada categoría de impacto en el proceso de fabricación de APR. ....	160
Figura 8. 10: Ciclo de vida del APR. ....	162
Lista de Tablas	
Tabla 2. 1: Propiedades del ladrillo de PET. ....	40
Tabla 3. 1: Descriptores de forma y densidad aparente de las muestras de plástico RAEE. ....	54
Tabla 3. 2: Módulos de finura de los agregados.....	56
Tabla 3. 3: Concentraciones de TBBPA en lixiviados en muestras de FPR. ....	60
Tabla 4. 1: Muestras y resistencia a la compresión.....	75
Tabla 4. 2: Estabilización de metales en matriz cementícea. ....	76
Tabla 5. 1: Tipos de cemento según Reglamento CIRSOC 201.....	80
Tabla 5. 2: Composición del cemento .....	81
Tabla 5. 3: Composición del cemento de albañilería.....	81

Tabla 5. 4: Número de iodo y área superficial específica de muestras de carbón activado. ....	82
Tabla 5. 5: Serie 1 de la dosificación del APR. ....	88
Tabla 5. 6: Serie 2 de la dosificación de APR. ....	88
Tabla 6. 1: Cuantificación de metales seleccionados en la extracción de FPRs y APRs <sup>1</sup> . ....	93
Tabla 6. 2: Extracción de componentes orgánicos en muestras de FPR y diferentes APR.....	95
Tabla 6. 3: Extracción de componentes orgánicos de diferentes APRs <sup>1</sup> . ....	100
Tabla 6. 4: Caracterización de los APRs <sup>1</sup> .....	103
Tabla 6. 5: Módulos de finura para las muestras. ....	106
Tabla 6. 6: Diseños de mezcla incorporados en esta investigación.....	108
Tabla 6. 7: Resistencia a la compresión para probetas de APR, FPR y arena gruesa como agregado a 28, 60 y 120 días.....	112
Tabla 6. 8: Resistencia a la flexión de las probetas con relación agregado:cemento 6:1. ....	116
Tabla 6. 9: Relacion valores de compresión frente a los de flexión para probetas representativas. ....	117
Tabla 6. 10: Capacidad de succión capilar de las probetas con AR, FPR y APR cómo agregado. ....	118
Tabla 6. 11: Angulo de contacto en relación al tiempo para las muestras analizadas.....	123
Tabla 6. 12: Síntesis del desempeño de las probetas estudiadas. ....	126
Tabla 7. 1: Etapas de proceso, tiempos y energía que consume cada máquina con su respectivo rendimiento. ....	129
Tabla 8. 1: Categorías de impacto más relevantes y sus definiciones.....	146
Tabla 8. 2: Inventario de entradas y salidas para la producción de APR.....	154
Tabla 8. 3: Resultados de la caracterización para 1 t de FPRT. ....	156
Tabla 8. 4: Comparación de impactos del proceso de producción de APR frente al proceso de producción de agregados naturales desarrollado por Cuenca y col. ....	161

#### Simbología y nomenclatura

AAS: espectrometría de absorción atómica.  
ABS/PC: acrilonitrilo butadieno estireno/ policarbonato.  
ABS: acrilonitrilo butadieno estireno  
ACV: Análisis de Ciclo de Vida (LCA en inglés).  
AEE: aparatos eléctricos y electrónicos.  
Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: alumina.  
APR: Agregado de Plástico Reciclado.  
AR: Arena de río.  
AS: árido sintético.  
ASTM: Sociedad Americana para Pruebas y Materiales.  
BFR: retardantes de llama bromados.  
Br: bromo.  
BT: bentonita.  
C061: Carbón activado Clarimex 061.  
CA: carbón activado.  
CaCO<sub>3</sub>: carbonato de calcio.

CaCO<sub>3</sub>: carbonato de calcio.  
CAT: Certificado de Aptitud Técnica.  
CB: Carbón activado Clarisol B.  
Cd: cadmio.  
CEVE: Centro Experimental de la Vivienda Económica.  
CFC: clorofluorocarburos.  
CG-FID: cromatografía de gases con detector de ionización de llama.  
CIRSOC: Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles.  
Cl: cloro.  
COP: Contaminantes Orgánicos Persistentes.  
CPF: cemento Portland ordinario.  
Cr: cromo.  
CU: Carbón activado Clarimex CAE ULTRA.  
EICV: Evaluación del impacto del ciclo de vida.  
FPR#3: fracción plástica de RAEE tamaño 3 mm.  
FPR#8: fracción plástica de RAEE tamaño 8 mm.  
FPR: fracción plástica de RAEE.  
FT-IR: espectroscopia de infrarrojos por transformada de Fourier.  
GC/MS: cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas.  
HBCD: hexabromociclododecano.  
HCFC: hidroclorofluorocarburos.  
HDPE: polietileno de alta densidad.  
HIPS: *High impact poliestiren*/poliestireno de alto impacto.  
ICV: Inventario de Ciclo de Vida.  
IRAM: Instituto argentino de racionalización de materiales.  
ISO: *International Standard Organization*.  
LDPE: *Low density polietilen*/ polietileno de baja densidad.  
LOD: límite de detección.  
LOQ: límite de cuantificación.  
MF: Módulo de finura.  
MgO: óxido de magnesio.  
MMF: Carbón activado MMF.  
P: fósforo.  
PA: poliamida.  
Pb: plomo.  
PBB: bifenilos polibromados.  
PBB: polibromobifenilos.  
PBDE: polibromodifeniléteres.  
PE: polietileno.  
PET: polietileno tereftalato.  
PMMA: polimetilmetacrilato.  
POPs: *Persistent Organic Pollulants*.  
PP: polipropileno.  
PS: poliestireno.  
PU: poliuretano.

PVC: policloruro de vinilo.

RAEE: residuos de aparatos eléctricos y electrónicos.

RDC: residuos de construcción y demolición.

RSU: residuos sólidos urbanos.

S/E – S/S: solidificación/estabilización – *Solidification/Stabilization*.

SAN: estireno acrilonitrilo.

Sb: antimonio.

Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: óxido de antimônio (III).

SEM: microscopia electrónica de barrido.

SETAC: *Society of Environmental Toxicology and Chemistry*.

SiO<sub>2</sub>: silicato.

TBBPA: tetrabromobisfenol A.

TCLP: procedimiento de lixiviación característica de toxicidad.

Ti: titanio.

UF: unidad funcional

US EPA: Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos.

VP: vertido de plásticos.

WEEE: *electrical and electronics equipment waste*.

XRF: fluorescencia de rayos X.

## CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En el apartado 1.1 de este capítulo se presenta una introducción del trabajo de investigación que se desarrolló en esta tesis, la problemática planteada que dio lugar a la investigación y el enfoque de análisis realizado. En el apartado 1.2 se expone la propuesta del componente para construcción frente a la problemática planteada. En el apartado 1.3 se presentan el programa teórico y experimental. En el apartado 1.4 se describen los objetivos generales y particulares de investigación y en el apartado 1.5 se presenta la estructura de esta tesis.

## 1.1. Introducción

Existe un tipo de residuos que ha sufrido un importante incremento en las últimas décadas; los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE). Los RAEE, también llamados o WEEE (*waste electrical and electronics equipments*, en inglés), constituyen uno de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) más preocupantes debido a su incremento, producto del rápido avance de las nuevas tecnologías y de tendencias que generan en los consumidores la necesidad imperiosa de renovar su aparato eléctrico o electrónico, aún con todas las consecuencias que este recambio conlleva. Existe una obsolescencia programada [1] que surge de la innovación, las nuevas funciones y materiales, acortando cada año la vida útil de los aparatos eléctricos y electrónicos. Esto hace que se procedan recambios cada vez más frecuentes y los aparatos se tornan obsoletos rápidamente.

Estos aparatos, una vez que culmina su vida útil por alguno de los motivos mencionados; terminan sin un destino específico o claro; se estima que el 50% permanece acumulado en oficinas, entes públicos, edificios u hogares, un 40% se entierra o descarta en basurales o rellenos sanitarios, 10% ingresa al mercado de los residuos y sólo un 2% es reciclado adecuadamente [2].

Dentro de la problemática general planteada, de este residuo se desprende una problemática particular que constituye el objeto de estudio y aplicación en esta tesis. La fracción plástica de RAEE (FPR).

La FPR constituye entre el 20 al 34% de los RAEE [3]–[5] y su composición es heterogénea, con mezclas de polímeros, aditivos y cargas. Más de 300 tipos diferentes de plásticos se pueden encontrar en este residuo [3], [6], [7].

Por otro lado, la FPR presenta en su composición metales pesados, [8]–[10] retardantes de llama bromados [11], y sustancias de descomposición de polímeros y otros componentes peligrosos. Estos, al permanecer depositados en el suelo, en basurales o rellenos sanitarios lixivian por acción de las lluvias contaminando las napas subterráneas, con las consecuencias en la salud de las personas y demás seres vivos que esta situación trae aparejada.

La FPR, además, al estar compuesto por plásticos de diversos tipos lo cuales reaccionan de manera diferente presenta una baja capacidad de reciclado, tanto mecánico o físico. El material generado a partir de una mezcla polimérica presenta propiedades impredecibles y generalmente, deficientes. Por otro lado, el hecho de presentar contaminantes metálicos y orgánicos unidos a la matriz polimérica, hace que su reciclado por termofusión, físico o mecánico para uso doméstico o industrial se torne peligroso tanto para quienes trabajan durante el proceso como para quienes usarán a futuro el componente diseñado.

En Argentina, se acumulan alrededor de 120.000 t de basura electrónica al año [2]. La ley 24.051 considera a los RAEE como materiales peligrosos, incorporó lineamientos del Convenio de Basilea [12] que regula la importación y exportación de RAEEs a nivel mundial con excepción de Estados Unidos, y expresa en el artículo 2 que: - *"Será considerado peligroso, a los efectos de esta ley, todo residuo que pueda causar daño, directa o indirectamente, a seres vivos o contaminar el suelo, el agua, la atmósfera o el ambiente en general"*. La ley compromete la generación, manipulación, transporte, tratamiento y disposición final de residuos peligrosos, considerando peligroso a todo residuo que pueda causar daño a seres vivos, contaminar el suelo, el agua, la atmósfera o el ambiente en general.

Es importante destacar que esta ley fue promulgada hace 26 años y que la explosión en las ventas de los Aparatos Eléctricos y Electrónicos (AEE) y consecuente preocupación por los efectos adversos que estos producen ocurrió unos años después en nuestro país, por lo que no están claramente diferenciados los RAEE entre los tipos de desechos peligrosos, pero sí están bien diferenciados por la ley las sustancias o categorías que serán sometidas a control, por lo que las empresas que se dedican al manejo de estos residuos en la actualidad deben o deberían cumplir con los requisitos que rige la norma.

Sin embargo, no existe una legislación específica en nuestro país que obligue a los generadores a hacerse responsables de ciclo de vida completo del producto o bien, a los ciudadanos a adoptar costumbres de reciclado, re-uso y separación de aparatos eléctricos y electrónicos en desuso.

Paralela a esta problemática, o bien, como consecuencia de la problemática ambiental que a la vez es producto de la producción en masa, se desprenden problemáticas a nivel social y económico. La desertificación, usurpación y ocupación de tierras fértiles ha generado disgregación social. El modelo capitalista lejos de solucionar, por ejemplo, el problema habitacional, genera pares opuestos, uno con una parte de la sociedad que accede a viviendas dignas, alimentación de calidad, acceso a tecnologías y salubridad y el otro par que sufre hambre, discriminación, pérdida de la dignidad, desarraigo, pobreza y vulnerabilidad, perdida de su cultura y valores. Se encuentran aislados en sus casas precarias, rodeados de contaminación que proviene de los basurales, rellenos sanitarios en donde terminan su vida útil, por ejemplo, todos los productos tecnológicos obsoletos.

Nos vemos entonces inmersos en una realidad injusta en la que las minorías no sólo no tienen acceso a viviendas dignas si no que en su entorno conviven la contaminación y la precariedad. Sin embargo, ramas de la ciencia, la tecnología junto a la economía, sociología y demás disciplinas intentan generar soluciones reparadoras ante esta problemática.

## 1.2. Propuesta de componente constructivo

La incorporación de los residuos sólidos plásticos en materiales de construcción ha sido estudiada como alternativa sostenible a la construcción tradicional. Mediante este método, los plásticos reciclados pueden ser re-usados sin que se comprometa su calidad y en reemplazo de materiales vírgenes [13].

Se considera que la incorporación de FPR en matrices cementicias, como tema de investigación en esta tesis, contribuye a facilitar el desarrollo y aplicación de un sistema que lleve a solucionar la problemática del reciclado de este desecho. Las piezas de FPR se encuentran disponibles en todo el país y cada vez en mayor cantidad y constituyen para los organismos, familias, instituciones e incluso empresas de manejo de residuos un problema ya que no han encontrado al momento un destino seguro, rentable y eficaz.

Sin embargo, los plásticos provenientes de los RAEE, siguen sin insertarse en un ciclo productivo determinado, que neutralice sus contaminantes, y se rija por los parámetros de sustentabilidad ambiental, económica y social.

Este trabajo de tesis se centra en generar un material compuesto, sustentable e innovador utilizando la totalidad de la fracción plástica de RAEE, con el desafío de superar la necesidad de separación previa debido a los altos costos de mano de obra, maquinaria, tiempo que se requiere y tomando como condicionantes la presencia de contaminantes metálicos y retardantes de llama, teniendo en consideración las propiedades técnicas requeridas en la construcción y el cuidado del ambiente.

Es posible reciclar los plásticos de RAEE al incorporarlos en nuevas mezclas para, por un lado, reducir al máximo la toxicidad del residuo y al mismo tiempo, obtener un material con buenas propiedades mecánicas.

## 1.3. Programa teórico experimental y metodología

El estudio teórico experimental propone avanzar en el conocimiento de la FPR, del cemento como ligante y aditivo con propiedades conocidas de estabilización de contaminantes metálicos, a la vez en el estudio, búsqueda y análisis de adiciones capaces de estabilizar contaminantes orgánicos que se encuentran en la matriz polimérica. En base a estos conocimientos adquiridos, se propone avanzar en el diseño de un

material aplicable a construcciones civiles, con una tecnología sencilla y económica que soluciones tanto las problemáticas ambientales como habitacionales.

Para el desarrollo de nuevos materiales y componentes constructivos aplicando materiales reciclados se utilizará la metodología Exploratoria, descrita por Sabino [14]. Este tipo de investigación se realiza cuando el tema ha sido poco explorado, y aparece un nuevo fenómeno que, por su novedad, no ha sido aún objeto de una investigación sistemática.

### 1.3.1. Plan de trabajo

En la Figura 1.1 se presenta un esquema que resume los puntos principales del plan de trabajo que comienza con una etapa exploratoria, luego experimental y finalmente concluye con las propuestas definitivas.

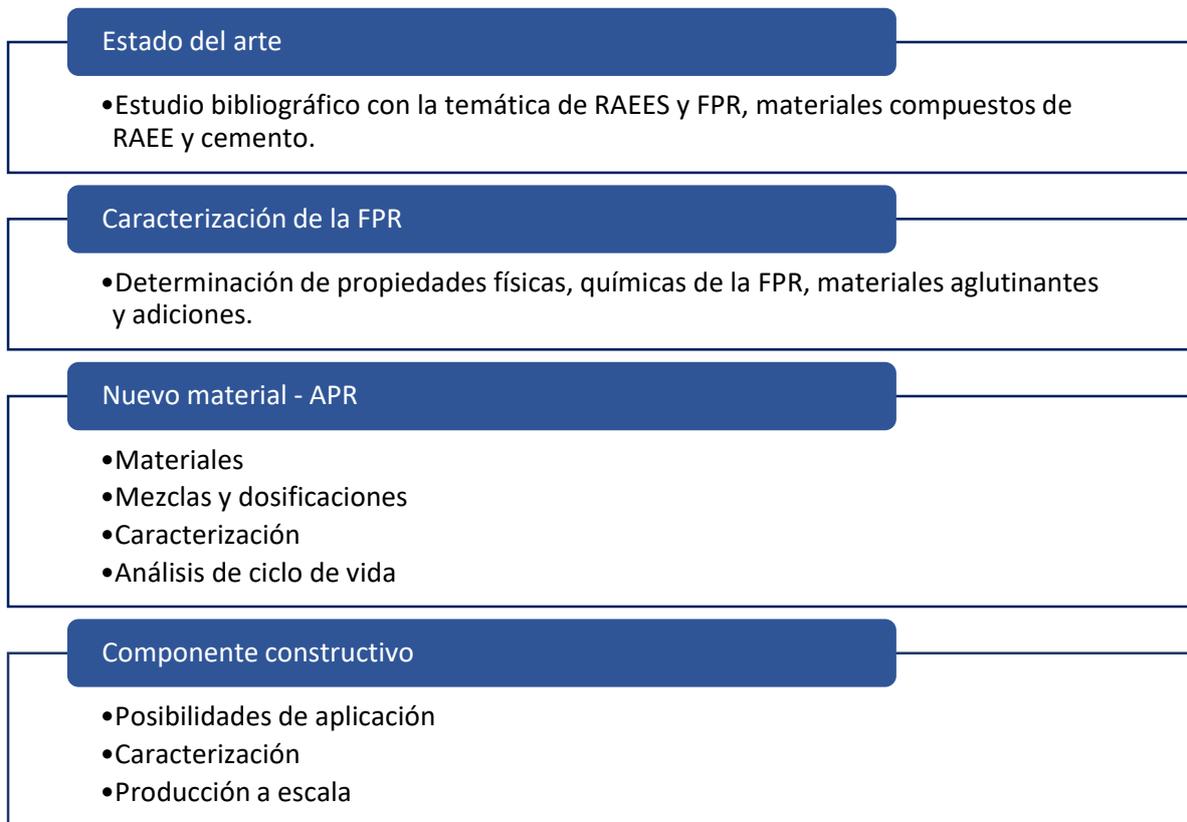


Figura 1. 1: síntesis esquemática del plan de trabajo.

### 1.3.2. Hipótesis

Es posible desarrollar componentes aptos y seguros para usar en la industria de la construcción reciclando la fracción plástica de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos.

## 1.4 Objetivos

### 1.4.1 Objetivo general

Desarrollar una tecnología de revalorización de la fracción plástica de RAEE para promover su uso en la industria de la construcción.

#### 1.4.2 Objetivos particulares

- Estudiar y analizar las propiedades químicas y físicas de la fracción plástica de los RAEE recolectados en Argentina, así como también la presencia y posibilidades de neutralización de contaminantes peligrosos para el ser humano y el ambiente.
- Analizar diversas composiciones de material plástico reciclado con diferentes combinaciones de matriz cementicia – aditivos.
- Fabricar componentes constructivos y aplicaciones para el material mediante un proceso sencillo, de bajo costo, factible de ser desarrollado por emprendimientos de la economía social.
- Analizar comparativamente el desempeño del material a desarrollar mediante un Análisis de Ciclo de Vida.

#### 1.5 Estructura de la tesis

Capítulo 1: Introducción y objetivos: Se presenta la introducción del trabajo de investigación, la problemática que dio lugar a la investigación y el enfoque abordado; la solución propuesta a la problemática y los objetivos generales y particulares de la investigación y el alcance de la misma.

Capítulo 2: Marco Teórico: Los residuos sólidos urbanos (RSU) como punto de partida para contextualizar la problemática planteada. Se desarrollan los conceptos de sustentabilidad, eco diseño, obsolescencia programada entre otros y se aborda la realidad en cifras de los RSU a nivel mundial. Luego se caracterizan residuos plásticos, los diversos tipos de plásticos que existen y sus posibilidades tecnológicas. Seguidamente, se desarrolla el concepto de Aparato Eléctrico y Electrónico y se profundiza en la problemática relacionada al residuo en general y a la fracción plástica en particular, abordándola desde los daños a la salud que puede provocar. Finalmente, se desarrolla el análisis de las normativas vigentes a nivel global y regional sobre el control y manejo de los RAEE.

Capítulo 3: Caracterización física y química de la FPR: Se realiza un estudio bibliográfico de las propiedades químicas y físicas del residuo. Se desarrollan análisis propios de lo observado en la bibliografía mediante ensayos de FT-IR para establecer composición polimérica, análisis visuales de color, tamaños y tipos de plásticos, extracciones por procedimiento de lixiviación característica de toxicidad (TCLP) para determinar la presencia de compuestos metálicos en la muestra y análisis de lixiviados de contaminantes orgánicos, mediante extracciones en agua a temperaturas variables.

Capítulo 4: Material compuesto a base de FPR: Antecedentes de materiales compuestos con base cementicia e incorporación de plásticos en reemplazo de agregados naturales. Técnica de estabilización utilizando cemento Portland como ligante, carbón activado y otros materiales minerales como neutralizantes/estabilizantes de contaminantes orgánicos. Se aborda el tema de los morteros de cemento, las normas por las cuales debe regirse su aplicación y las posibilidades de agregados disponibles para morteros naturales y reciclados.

Capítulo 5: Desarrollo de Agregado de Plástico Reciclado a partir de la FPR. Se presenta la propuesta de un Agregado de Plástico Reciclado (APR) y su programa experimental; se describen los materiales que componen el agregado desarrollado, el sistema y el procedimiento de mezclado seleccionado para su

elaboración. Finalmente, se presentan las mezclas de mortero cementicio preparadas para la elaboración de probetas con los distintos APRs.

Capítulo 6: Caracterización del APR: Se presentan resultados de diferentes ensayos aplicados al APR que determinan propiedades físicas como conductividad térmica, succión capilar, ángulo de contacto, rugosidad y porosidad; Propiedades químicas como, al igual que las muestras de FPR, extracciones por procedimiento de lixiviación característica de toxicidad (TCLP) para determinar la presencia de compuestos metálicos en la muestra y análisis de lixiviados de contaminantes orgánicos, mediante extracciones a temperaturas variables y estudio de aguas de curado y luego se contrastan los resultados con los de la muestra de FPR. Se desarrolla luego la caracterización de propiedades mecánicas como resistencia a la tracción y compresión de las muestras bajo la norma IRAM 1622:2006 [15]

Capítulo 7: Componentes constructivos con APR: se desarrollan propuestas de componentes constructivos con APR como agregado en reemplazo del agregado natural. Se desarrolla el diseño, la caracterización y formulación de ladrillos, blocks, placas, losetas, pre moldeados. Se desarrolla la propuesta de un sistema modular de fabricación sencillo y adaptable a diversas necesidades. Se plantea el diseño de planta productora, maquinarias e inversión necesarias y el Layout correspondiente.

Capítulo 8: Análisis de Ciclo de Vida. Se presenta un análisis de ciclo de vida preliminar del proceso de fabricación de APR que determina su elegibilidad frente a otros agregados y otros manejos del residuo.

Capítulo 9: Conclusiones: De desarrollan conclusiones generales del trabajo, las cuales contemplan las conclusiones parciales que se van desarrollando en cada capítulo y responden a la hipótesis y objetivos del trabajo.

## CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO

En el apartado 2.1 se describe la conceptualización y caracterización de los aparatos eléctricos y electrónicos mientras que en el apartado 2.2 se hace referencia especialmente a la fracción plástica de los mismos. Dentro de este apartado se desprenden el apartado 2.2.1 que desarrolla la composición respecto a la contaminación por metales pesados de esta fracción de residuos y el 2.2.2 que hace referencia a la contaminación por contaminantes orgánicos. En el apartado 2.3 se presentan los posibles daños a la salud relacionados al manejo del residuo. En el 2.4 las normas legales que surgen en relación a esto y en el apartado 2.5, cuáles son las posibilidades de manejo y tratamiento actuales respecto al residuo. En el apartado 2.6 se abordan conceptos de sustentabilidad y de allí se desprende el apartado 2.6.1 con temas relacionados a la construcción sostenible y antecedentes existentes en relación a componentes en base a materiales reciclados.

## 2.1. Los residuos de aparatos electrónicos y electrónicos

Los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, también llamados “e-waste” o WEEE en inglés, son los residuos provenientes de aparatos eléctricos o electrónicos en desuso como computadoras, notebooks, equipos de música, electrodomésticos, etc. Por ser este un residuo relativamente nuevo, es decir que comenzó a generarse en cantidades preocupantes hace sólo dos décadas, su definición no está establecida todavía de manera precisa y universal; existen tantas definiciones como normativas, directrices y políticas a nivel mundial. Algunas de estas definiciones son por ejemplo la de la Directiva de la Unión Europea que los define como “Equipos eléctricos y electrónicos que son desechos... incluidos todos los componentes, subconjuntos y consumibles que forman parte del producto en el momento de su desecho” [16]. Por su parte, la Red de Acción de Basilea define al conjunto de residuos como los desechos de una amplia y creciente gama de dispositivos electrónicos como dispositivos domésticos, teléfonos celulares, computadoras, entre otros, que han sido desechados por sus usuarios [17].

La Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE), los define como “Cualquier aparato que utilice una fuente de alimentación eléctrica que haya llegado al final de su vida útil” [18].

Las fuentes de RAEE son numerosas y particularmente diversas. Se enumeran a continuación las diez categorías de acuerdo con la Directiva 2002/96/CE del Parlamento Europeo y el Consejo [16]:

- Grandes electrodomésticos (lavarropas, heladeras, estufas eléctricas, hornos microondas, aires acondicionados).
- Pequeños electrodomésticos (limpiadores eléctricos, tostadoras, freidoras, relojes).
- Equipos de Tecnología de la información y telecomunicaciones (notebooks, computadoras, mouse, teclados, pantallas, impresoras, impresoras, teléfonos).
- Equipo de consumo (radios, televisores, cámaras).
- Equipos de iluminación (lámparas fluorescentes, lámparas de descarga, lámparas de sodio).
- Herramientas eléctricas y electrónicas (sierras, taladros, máquinas de coser).
- Juguetes, equipos de ocio y deportes (coches eléctricos y trenes, videoconsolas, máquinas tragamonedas).
- Dispositivos médicos (equipos de cardiología y radioterapia, diálisis, respiradores pulmonares, congeladores, analizadores, pruebas de fertilización).
- Instrumentos de monitoreo y control (detectores de humo, termostatos, pesaje, medición o ajuste de aparatos para aparatos domésticos).
- Dispensadores automáticos (dispensadores para botellas frías o calientes, bebidas calientes, productos sólidos, cajeros automáticos).

Los RAEE han incrementado su cantidad en las últimas dos décadas, estando el foco en los residuos de grandes electrodomésticos o pequeños aparatos con alto valor residual [3].

Al año 2019 ya se habían generado 53,6 Mt de RAEEs a nivel mundial, correspondiendo; 13,1 Mt sólo a las Américas y 3,9 Mt a América del Sur con 2.143 kt para Brasil, 465 kt para Argentina y 318 kt para Colombia [19].

Las tendencias, las modas y el marketing generan en los consumidores la necesidad imperiosa de renovar su aparato. Una obsolescencia programada [2] que surge de la innovación, las nuevas funciones y materiales, acortando cada año la vida útil de los aparatos eléctricos y electrónicos hace que se procedan recambios cada vez más frecuentes ya que los aparatos se tornan obsoletos rápidamente.

Bajo estas circunstancias, los RAEE son desechados de manera constante e incluso no llegan siquiera a esa condición, sino que se acumulan por años en instituciones, hogares, a la espera de un posible destino [20].

El RAEE constituye un residuo de composición heterogénea compuesto por diferentes materiales y componentes de origen químico, de los cuales, algunos se consideran peligrosos para la salud de las personas y el ambiente. Se estima que los RAEE están compuestos por una gran cantidad de materiales valiosos y al mismo tiempo, peligrosos unidos de forma compleja [21][22]. Podemos encontrar metales ferrosos en porcentajes de entre 15 y 36%, metales no ferrosos en porcentajes de entre 5 y 15% ,vidrios en un 20% y plásticos entre un 20 y 34% según distintos autores [5][23][24].

En la Figura 2. 1 y la Figura 2. 2 se muestran figuras desarrolladas por diferentes autores que caracterizan el residuo. En las figuras puede verse la presencia de aditivos, metales pesados y sustancias halogenadas.

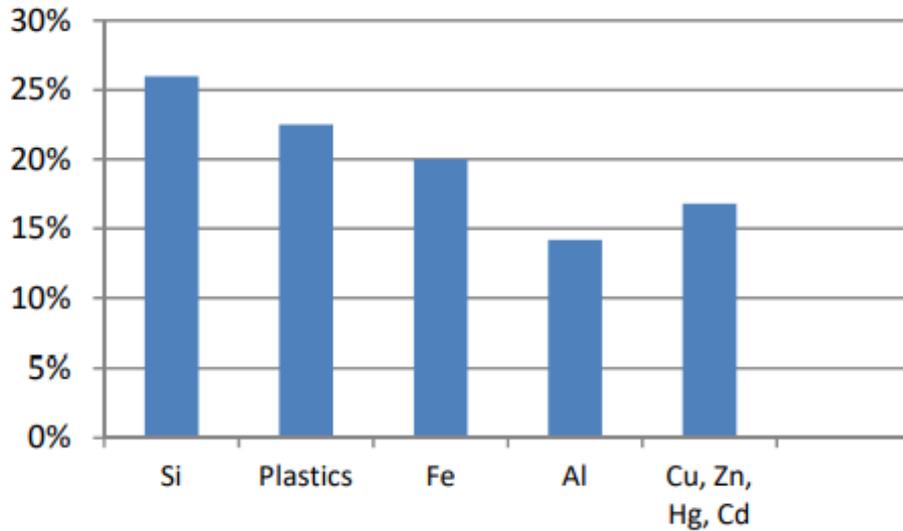


Figura 2. 1: Porcentajes de composición de RAEEs [25].

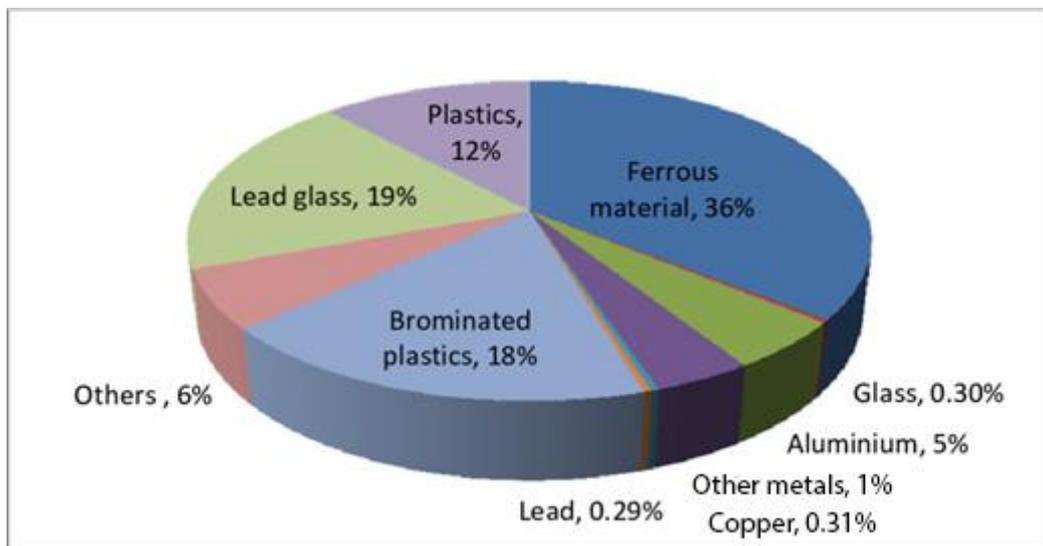


Figura 2. 2: Composición del material de los desechos electrónicos [26].

## 2.2. La fracción plástica de los RAEE (FPR)

La fracción plástica de los RAEE (FPR) forma, en promedio, más de un tercio del peso total de la masa, entre un 20 y 34% según distintos autores, siendo los componentes electrónicos y los metales los que le

siguen en porcentaje [9] [4] [27][30]. Dicha fracción es de composición heterogénea; más de 300 tipos diferentes de plásticos se pueden encontrar en el residuo [6], [9], [28]–[30] entre los cuales, según diversos autores presenta mezclas de: ABS/PC (acrilonitrilo butadieno estireno/ policarbonato) en un 5%; PMMA (polimetilmetacrilato): 3%; PC: 3%; PA (poliamida): 1%; ABS: 29% a 38%; HIPS (poliestireno de alto impacto): 26% a 42%; PP (polipropileno): 10 a 22%; y otros polímeros, PE, SAN (estireno acrilonitrilo), PET, poliuretano (PU), mezclas de HIPS/PP [28] en un 11% [6], [10] siendo los polímeros dominantes; PS, ABS, PC/ABS, HIPS y PP [31] y la combinación de ABS con HIPS, el 55% de todos los plásticos de RAEE [16].

En la Figura 2. 3, se muestra una composición de plásticos en una muestra de RAEE estudiada por Maris y col. [6].

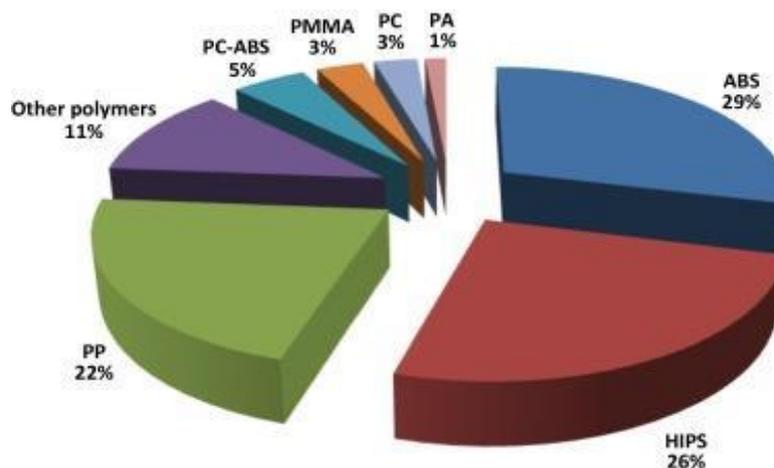


Figura 2. 3: estimación de la composición polimérica de lote de 10 t. de FPR (6).

Los aditivos y cargas que contiene la FPR son: fósforo (P); cloro(Cl); antimonio (Sb); bromo (Br); Cromo (Cr); Cadmio (Cd); Plomo (Pb); Óxido de magnesio (MgO), Alúmina ( $Al_2O_3$ ); Silicato ( $SiO_2$ ); carbonato de calcio ( $CaCO_3$ ) y titanio (Ti) [6] Esta característica hace que su reciclado sea aún más complejo debido a que los procesos de separación requerirían un costo y tecnologías extra correspondientes a la incorporación de pasos en la cadena de producción, como la selección manual, disolución selectiva, flotación, fluorescencia de rayos X, espectroscopia láser, entre otros [32].

El plástico de RAEE, aparte de plástico virgen (ABS, HIPS, etc.), presenta una concentración importante de metales pesados, sustancias halogenadas y derivados de la descomposición de los plásticos [33] y hasta un 9% de cargas minerales como negro de humo, talco, dióxido de titanio y carbonato de calcio, entre otras [34].

### 2.2.1. Metales pesados

La presencia de metales pesados en la fracción plástica de los RAEE, como el cadmio que se emplea como pigmento, estabilizador o catalizador durante el proceso de polimerización de, por ejemplo, el ABS [3], [8], [10] otros como [37] que se aplica como sinérgico junto a los BFR. Estudios demuestran que al aluminio, calcio, cobre, hierro, magnesio, níquel, plomo y zinc en distintas concentraciones [10] [35] y de sustancias químicas tóxicas persistentes que contaminan el ambiente y afectan a la salud de las personas [2]. Estudios diversos han detectado hierro en niveles de hasta 700 ppm, plomo en 200 ppm y Cadmio en 70 ppm [10]. Silicio, Magnesio y Aluminio en otros trabajos resultaron los elementos más abundantes,

[36] con cantidades considerables de Titanio, Zinc y Hierro [9], [23], mientras que Plomo y Cromo, en trazas, Calcio en menos de 100 ppm y Cadmio en cantidades insignificantes [36]. También se presenta en un alto porcentaje el Antimonio. El Antimonio es un metaloide del mismo grupo del Fósforo y el Arsénico y, al igual que el Arsénico; el Antimonio se relaciona con varios tipos de cáncer [38] [39] y se filtra en jugos cítricos y agua potable en botellas de PET, por lo que debe eliminarse con cuidado y supervisión [39] [40]. A medida que el volumen de RAEEs crece, los compuestos tóxicos se incrementan también, y generan daños tanto en el ambiente como en la salud humana [41]. Al ser dispuestos en un basural sin tratamiento previo, los metales pesados, entre otros compuestos que suelen contener, migran mediante procesos de lixiviación hacia las napas de agua y al ambiente [42].

### 2.2.2. Retardantes de llama bromados

Por otro lado, el plástico de los RAEE, también por estar en contacto con circuitos electrónicos, debe cumplir con ciertas normas de seguridad establecidas para evitar la propagación de incendios; para esto se utilizan sustancias químicas que se agregan mediante reacción o adición para aumentar su resistencia al fuego: los retardantes de llama bromados (BFRs por *Bromated Flame Retardant* en inglés), como clase química incluyen éteres bifenílicos aromáticos, cíclicos alifáticos, derivados fenólicos alifáticos, derivados de anhídrido ftálico y otros [43]. La combinación reactiva produce plásticos con presencia de retardantes de llama que se filtran continuamente del producto final [44]. El óxido de antimonio (III) ( $Sb_2O_3$ ), uno de los metales pesados que se encuentran normalmente en lixiviados de plásticos de RAEE, se usa principalmente en combinación con los BFRs como sinérgico con un contenido típico de  $Sb_2O_3$  de 3 a 5% en peso en los plásticos de BFR [45], es decir, 2,5 a 4,2% de Sb, y una proporción de  $Sb_2O_3$  a BFR que normalmente se encuentra entre 0,25 y 0,5. Wäger y col. observaron un amplio rango de relación Sb:Br, desde 0,07 hasta 0,33 [46], mientras que, otro caso la relación Sb:Br en las muestras originales varía entre 0,8 y 2,4 [47].

Existen actualmente 75 tipos de BFRs disponibles en el mercado, siendo los más comunes y prioritarios los polibromodifeniléteres (PBDE) incluyendo mezclas comerciales de PentaBDE, OctaBDE y DecaBDE, el tetrabromobisfenol A (TBBPA) y el hexabromociclododecano (HBCD) [48][49]. Se aplican en gran cantidad de materiales que requieran de resistencia al fuego, pero es en los aparatos eléctricos y electrónicos donde junto al óxido de antimonio (III) como sinérgico [9] [16] [50], se presentan los mayores porcentajes de aplicación (56%). Se contabilizan anualmente y a nivel mundial, en los flujos de RAEE; 50 t de mercurio y 71 kt de BFR [19].

Los principales BFR que se utilizan en los plásticos de RAEE son, como se mencionó anteriormente el TBBPA, PBDE y HBCD. Son persistentes en el medio ambiente, bioacumulativos por lo que contaminan la cadena alimentaria, incluso la leche materna, produciendo efectos adversos en la salud humana, sistema nervioso y sistema reproductivo [51]. Por esto, los procesos de reciclaje deben ser adecuados a estas características.

El TBBA es el BFR que se usa en la mayoría de los AEE representando alrededor del 60% del mercado [52]. Es un polvo cristalino blanco, que contiene un 50% de bromo [53]. Se aplica principalmente en plaquetas electrónicas, en plásticos, también en materiales de construcción, textiles tanto como para prevenir o ralentizar la propagación del fuego [54]–[59]. También suele aplicarse en revestimientos de ingeniería, resinas epoxi, poliésteres termoplásticos, poliuretano, espumas de poliestireno (poliestireno expansible-EPS), resinas de poliolefina, poliestireno, poliolefinas y copolímeros [57], [59], [60]. En la Figura 2. 4 se presenta la fórmula química desarrollada de esta sustancia.

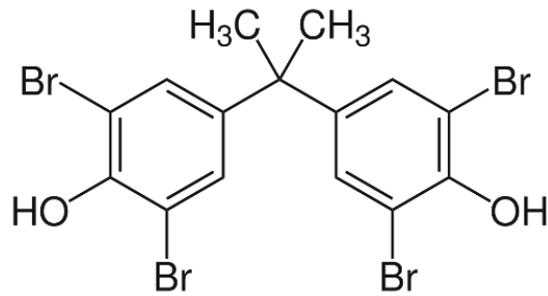


Figura 2. 4: Fórmula química desarrollada del Tetrabromobisfenol A (TBBPA).

Esta sustancia es el retardante de llama bromado más vendido [61] y genera gran preocupación debido a que es considerado un contaminante orgánico persistente por la Directiva RoHS [46]. Genera daños ambientales impregnándose en suelos, aire, agua, musgos, sedimentos y alimentos [54], [57], [62]–[66] a la vez, provoca graves daños en la salud humana afectando, por ejemplo, tres proteínas que se relacionan directamente con procesos de formación cerebral en la etapa neonatal [67]–[71]. Se han encontrado efectos de alteración endocrina, inmunotoxicidad, neurotoxicidad y toxicidad para el desarrollo reproductivo [72]. Meerts y col. [73] informaron por primera vez que TBBPA afecta la unión de hormona tiroidea a la transtiretina humana in vitro, lo que puede tener efectos sobre el transporte y metabolismo de la hormona tiroidea.

Por su parte, el PBDE que se aplica en muebles, plásticos, textiles, recubrimientos en circuitos electrónicos provoca daños en biota, alimentos, aire en interiores de oficinas, entornos domésticos, guarderías e instalaciones de reciclaje de electrónicos, en la salud de las personas puede provocar criptorquidia, patologías que mujeres embarazadas pueden trasladar al feto por la placenta y diabetes, entre otras enfermedades [74]–[78].

Por último; el HBCD; que se puede encontrar en espumas aislantes de poliestireno, en edificios o construcciones en general, y en el HIPS de los AEE provoca daños ambientales relacionados con los rellenos sanitarios y el reciclaje. Los daños en la salud que puede generar van desde daños en la hormona tiroidea, daños en el desarrollo del cerebro hasta daños en el ADN [79]–[84]. Los niveles presentes de BFR varían incluso entre plásticos de la misma categoría; lixiviados de TBBPA y HBCD fueron determinados por Kousaiti y col, quienes encontraron los valores más altos en muestras de PC/ABS y ABS [85].

Si bien los retardantes de llama son una solución a la propagación del fuego, pueden salvar vidas y prevenir daños materiales, también son objeto de una creciente preocupación sobre sus impactos medioambientales y efectos sobre la salud ya que no son adecuadamente tratados en la actualidad por el sector informal, generando riesgos tanto para los trabajadores como para los consumidores [47]. Algunos de ellos ya han sido probados como perjudiciales para el ambiente o los seres humanos, y se ha cesado su producción [86].

### 2.3. Daños a la salud relacionados con el manejo de RAEE

Las personas que trabajan de manera no controlada en los procesos de desmantelamiento, separación o reciclaje de RAEEs, están expuestos a graves daños en la salud debido a la inhalación de humos o partículas tóxicas. Estas personas trasladan la contaminación a sus familias de manera directa por contacto o bien, las sustancias viajan por las aguas que luego son consumidas por las familias de la zona o trasladadas a la tierra trabajada para la siembra o simplemente en la tierra en donde los niños juegan y

pasan la mayor parte del tiempo. Los fetos, los lactantes, los niños y los adolescentes son particularmente vulnerables a los daños que ocasiona la exposición a productos tóxicos procedentes de residuos electrónicos debido a su fisiología, comportamiento y el mayor número de vías de contaminación en comparación con los adultos [87][88].

En el Informe; Observatorio mundial de los residuos electrónicos 2020 [21] se resumen los efectos que diversos autores han encontrado producto del manejo informal de RAEEs. Estos se generan en los lugares en donde se trabaja con el residuo, en los cuales viven, juegan y transitan personas adultas y niños que inhalan humos y partículas tóxicas, tocan superficies contaminadas, ingieren alimentos y agua contaminados, incluso las madres pueden traspasar la contaminación a los fetos o mediante la lactancia. Estos efectos son, entre otros, problemas en el parto, alteraciones en el desarrollo neurológico, problemas de aprendizaje, daños en el ADN, problemas cardiovasculares, respiratorios, inmunológicos, enfermedades de la piel, pérdida de audición, y cáncer. Así mismo, los trabajadores informales en manejo de RAEE sufren efectos adversos como dolor de cabeza, estrés, trastornos genitales, reproductivos, entre otros. Pero aún no está comprobado si se trata fehacientemente de daños producto del contacto con RAEEs o simplemente casos aislados. Lo que sí se sabe con seguridad es que, sustancias químicas procedentes de RAEEs como el plomo, el mercurio, el cadmio, el cromo, y demás aditivos producen graves consecuencias en casi todos los sistemas orgánicos [89].

#### 2.4. Marco legal y actuaciones gubernamentales a nivel mundial, nacional y local

Como respuesta a la problemática de contaminación por metales pesados y BFR en los RAEE, la Directiva de la Unión Europea 2002/95/CE [16] y su actualización en 2012 [90] y la Directiva RoHS en aparatos eléctricos y electrónicos [46], determinaron que los estados miembros deberán garantizar que, a partir del 1º de Julio de 2006, los nuevos AEE que se inserten en el mercado no deberán contener plomo, mercurio, cadmio, cromo hexavalente, polibromobifenilos (PBB) o polibromodifeniléteres (PBDE) [91], luego en la modificación, se determinaron valores máximos de concentración de sustancias tóxicas debido a que se tornó imposible suprimirlos totalmente de la composición de las materias primas. Se determinó entonces un máximo de concentración de plomo, mercurio, cadmio, cromo hexavalente, PBB y PBDE de 0,1% en peso y de 0,01% en peso para el Cadmio [92].

Con respecto a los compuestos volátiles en el ambiente se llevó a cabo el Convenio de Estocolmo (Suecia) sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes (POPs por *Persistent Organic Pollutants* en inglés). Los POPs son sustancias químicas que suponen una amenaza para la salud humana y el ambiente debido a que son resistentes a la degradación, son bioacumulables es decir; se incorporan en los tejidos vivos pudiendo aumentar su concentración, según sube a niveles más altos de la cadena trófica, son tóxicas para la salud humana y el ambiente, y porque pueden trasladarse a largas distancias llegando a regiones en las que nunca se han producido ni utilizado, generando problemas de salud que se transmiten por generaciones, especialmente en países en desarrollo y comunidades indígenas [4]. El objetivo de este convenio fue la protección de la salud humana y el ambiente mediante la reducción o eliminación de las emanaciones al aire y se ratificó en 152 países [93]. Un ejemplo de POP son los mencionados BFRs que contiene la FPR (PBDE, PBB y TBBPA).

Por lo tanto, a nivel mundial, a los fines de preservar y garantizar la calidad del ambiente, la producción, incorporación en materiales y fin del ciclo de vida de estas sustancias han sido regulados.

Por su parte Argentina, no cuenta con una ley a nivel nacional que regule el manejo de RAEEs [94], sólo algunas provincias como Santa Fe, Tierra del Fuego, entre otras y Buenos Aires que, propuso la ley 14.321 en 2011 cuyo alcance era nacional pero que llegó solo a media sanción por el senado; han logrado

promulgar leyes que regulan la gestión, promueven la Responsabilidad Extendida de Productor y básicamente incorporan lineamientos de convenios internacionales como el Convenio de Basilea [12] que regula la importación y exportación de RAEEs a nivel mundial, con excepción de Estados Unidos, y expresa en el artículo 2 que: - *"Será considerado peligroso, a los efectos de esta ley, todo residuo que pueda causar daño, directa o indirectamente, a seres vivos o contaminar el suelo, el agua, la atmósfera o el ambiente en general"*. La ley compromete la generación, manipulación, transporte, tratamiento y disposición final de residuos peligrosos, considerando peligroso a todo residuo que pueda causar daño al ambiente en general.

Dada su estructura federal, en Argentina, las leyes que rigen en una provincia no son de carácter obligatorio para las demás, solo funcionan como lineamientos a los cuales una provincia interesada puede aplicar o no. Sólo la ley 24.051 sobre exportación e importación de Residuos Peligrosos que incorpora lineamientos del convenio de Basilea rige a nivel nacional pero la misma se enfrenta a situaciones diversas y diferentes concepciones dentro del mismo país. Narváez [95], concluye que se está dentro de una "laguna legislativa" que hace que la mayoría de los RAEEs terminen en basurales, rellenos sanitarios, incinerados o incluso almacenados por tiempo indeterminado debido a la ausencia de un marco legal de nivel nacional.

Iniciativas sociales en Argentina, como en otros países [47], en la búsqueda de mejorar la calidad de vida de los habitantes, han incurrido en trabajos de incorporación de materiales peligrosos en la construcción de viviendas. Por ejemplo, en la ciudad de Chajarí, provincia de Entre Ríos se recogen y desmantelan los RAEE sin ningún tipo de control, luego el plástico de tritura de la misma manera para desarrollar finalmente adoquines de cemento, baldosas y macetas [96].

Esto implica un riesgo bastante alto en términos de impacto ambiental y para la salud, principalmente debido a la presencia de compuestos peligrosos en estos plásticos, y la poca conciencia desarrollada entre la población sobre su presencia y peligrosidad.

Muy recientemente; en 2020 ha sido sancionada la Ley N° 13.940 [97] sobre la gestión integral y sustentable de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos en la Provincia de Santa Fe. La ley establece un conjunto de pautas, obligaciones y responsabilidades para llevar a cabo una gestión integral y sustentable de los RAEE que se produzcan o comercialicen en la Provincia de Santa Fe, y obliga a productores, distribuidores, gestores, usuarios y consumidores a favorecer las actividades tendientes al reciclado, a la disminución del consumo, al diseño para el reciclaje y sobre todo define la responsabilidad extendida del productor como la obligación de todo productor o distribuidor de RAEE de adoptar medidas para mitigar el impacto ambiental durante todo el ciclo de vida del mismo, desde su fabricación hasta su fin de vida útil.

## 2.5. Manejo de RAEE

El manejo de RAEE consiste en la recogida, separación y distribución de los residuos. La recogida formal es realizada por organizaciones designadas, productores y/o el propio gobierno. Los mismos, se ocupan de la recuperación a través de comercios de minoristas, puntos municipales de recogida y/o servicios de recogida. El destino final de los RAEE recuperados son instalaciones de tratamiento especializadas, en las que se recuperan los materiales valiosos en condiciones controladas desde el punto de vista ambiental y se gestionan las sustancias peligrosas de forma ambientalmente racional. Luego, los residuos se incineran o depositan en vertederos controlados.

Entre los distintos tratamientos o manejos existentes para los RAEE a nivel mundial podemos encontrar: vertedero, reciclaje mecánico, valorización energética y reciclaje de materias primas [98].

El vertedero o relleno sanitario, principal método de tratamiento de RAEE en la actualidad [98]–[101] se torna la opción más económica. Más del 90% de los residuos se vierten en vertederos actualmente [102].

El vertido o enterramiento de los residuos debajo de las capas de la tierra no es un método inofensivo; provoca lixiviación de materiales nocivos al suelo y aguas subterráneas, emisión de gases de efecto invernadero como el metano lo que provoca daños ambientales y en la salud humana [4].

Por estos motivos, en 2015 los Estados Miembros de las Naciones Unidas aprobaron 17 Objetivos como parte de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) se plantearon con el objetivo de establecer un plan para alcanzarlos en un plazo de 15 años y serán detallados más adelante.

Una vez recogidos formalmente los RAEEs y separados en las plantas de tratamiento se comienza con procesos de reciclaje primarios y secundarios, es decir; la formación de nuevos productos sin modificar las propiedades inherentes para así obtener un producto con casi el mismo nivel de rendimiento original. Castells [103] define al reciclaje de residuos como la transformación de los mismos dentro de un proceso de producción, para su fin inicial u otros fines, incluyendo el compostaje y la biometanización pero dejando afuera a la incineración como recuperación de energía. Juega un papel clave en la protección del ambiente debido a que mantiene los desechos peligrosos fuera de los vertederos y basurales. Para los plásticos, el reciclaje es la mejor solución para reducir el impacto ambiental en contraposición al relleno sanitario e incineración que atentan contra los recursos naturales y consumo de energía [13]. Existen 4 categorías de reciclaje, la primaria (re-extrusión), la secundaria (mecánica), la terciaria (química) y la cuaternaria (recuperación energética). Para la re-extrusión entonces se requiere un solo tipo de polímero, este desecho (también llamado “*scrap*”) debe estar limpio o semi limpio, [104] condiciones que se tornan complejas ante la heterogeneidad de los copolímeros de los RAEE y la inmiscibilidad de los mismos, lo que resulta en mezclas con propiedades mecánicas deficientes debidas a la segregación en fases de las cargas [105] y a los materiales peligrosos que presenta como el cadmio, el plomo, cromo, los BFR, CFC, entre otros [106].

El proceso general de reciclado de RAEEs en países desarrollados comienza con la recuperación del residuo y luego la separación por tipo; descontaminación y comercialización [25]. Podría decirse que el proceso de reciclaje de RAEEs en Europa es apropiado ya que permite reciclar la FPR de manera eficiente. Luego de recuperar los metales y el resto de materiales valiosos de aparato para su comercialización o reciclado, el tratamiento de la FPR se desarrolla con una serie de pasos tales como clasificación, lavado, molienda y separación. La FPR es separada mediante métodos por densidad [107] o bien, con tecnologías de detección y cribado que permiten identificar la presencia de BFRs y metales pesados [108]. Los plásticos que pueden recuperarse para re manufactura son sólo los libres de BFRs y metales peligrosos [109], la fracción se clasifica y separa para ser enviada a la producción de plásticos reciclados [47] que cuenta con altas tecnologías de trituración, extrusión o inyección.

Las fracciones de peso medio y elevado, que presentan BFR y metales pesados pueden ser descontaminadas mediante procesos de disolución y precipitación [103], mediante el uso solventes, procesos químicos de purificación de poliolefinas y estirenos [110] o llevados a pirolisis, incineración con recuperación de energía o vertedero con tratamiento de lixiviados [111]. Incluso procesos más complejos se desarrollan, como pirolisis con mejora catalítica [5].

Vázquez y col. [128], determinan en su estudio los porcentajes de cada tipo de plástico en materiales compuestos a partir del reciclado para mantener las propiedades mecánicas aptas para un buen desempeño del material; el ABS puede soportar la adición de HIPS hasta un 50% en peso sin sufrir

deterioro mecánico y también con mejoras considerables en el alargamiento. Sin embargo, la adición de 80% en peso de HIPS da como resultado un deterioro de las propiedades del ABS. Por el contrario, HIPS puede tolerar el 20% en peso de ABS, con una pequeña disminución en el alargamiento, mayores cantidades de ABS deterioran notablemente las propiedades mecánicas de HIPS. Claramente, para poder llevar a cabo este proceso de extrusión conjunta con dichos porcentajes se requiere una separación previa [129], limpieza y purificación de los materiales incluso, una combinación con materias primas vírgenes, así como tecnologías de detección y cribado que permitan identificar la presencia de BFRs y metales pesados [130]. Los plásticos que pueden recuperarse bajo procesos de reciclaje primarios y secundarios son solo los libres de BFRs y metales peligrosos [7]. En efecto, es posible disminuir los niveles de BFR presentes en los polímeros, mediante procesos de disolución y precipitación. De esta manera pueden reducirse las sustancias contaminantes a niveles por debajo de 1000 ppm, obteniendo así piezas aptas para ser recicladas según la normativa vigente y sin degradación del material [33].

Más allá de todo esto y de que, Europa esté situado en la actualidad en primer lugar en trazabilidad y reciclado de RAEEs, de las 12,7 Mt que genera anualmente, sólo 3,5 millones de toneladas son correctamente desmanteladas, clasificadas y procesadas [19]. En este sentido, Cardamone et al. [22] señalan que en estos países aún no se logra llegar a una adecuada recogida y gestión debido a que las empresas gestoras no llegan a cumplir con los altos estándares determinados por las normativas. Esto se traduce en RAEEs manejados de manera informal seguido de vertido incontrolado [106] o incluso, exportación a países menos desarrollados como Asia y África [112].

Lo que sucede en Sudamérica y principalmente en Argentina, es completamente distinto. En Sudamérica sólo algunos países han logrado implementar un marco legislativo en últimos 5 a 10 años. México, Costa Rica, Colombia y el Perú desde 2020, trabajan por mejorar sus sistemas ya establecidos mientras que Brasil y Chile están en trabajando en la actualidad para lograr un marco normativo oficial de manejo de RAEEs [19].

En Argentina incluso no están desarrolladas las tecnologías ni las infraestructuras adecuadas para recuperar los materiales valiosos de los RAEEs. Las principales empresas privadas de manejo de RAEEs se encuentran en Buenos Aires, Santa Fe y Tierra del Fuego y el procesamiento que desarrolla consiste en una serie de pasos que incluyen; Recolección, generalmente en “puntos verdes” en donde se acopian los residuos por parte de la comunidad y desde donde los gestores autorizados retiran el material para gestionarlo. Luego, en las plantas de gestión de RAEEs se realizan etapas de separación desensamblado manual y/o recuperación de funciones, siendo, la re-funcionalización una actividad prioritaria en el país [20]. Bajo este sistema se recuperan gran cantidad de partes del aparato que aún funcionan y pueden ser re incorporadas sin mayores inconvenientes en aparatos que se encontraban en desuso por falta de insumos o repuestos. En relación a esto, en Argentina existen organizaciones gubernamentales o privados, programas universitarios que re-funcionalizan computadoras para donación. Las partes que no pueden ser re-funcionalizadas siguen diferentes rutas. Metales y vidrios sueltos son comercializados en el mercado interno o exportados para su reciclado, las placas de circuitos impresos se exportan a países desarrollados en donde se extraen los metales valiosos. Se estima que entre 2014 y 2018 más de 900.000 kilos de plaquetas de circuitos impresos se exportaron a Bélgica [20].

Por su parte, la FPR en las plantas argentinas es triturada sin separación previa (tanto polimérica o por presencia de contaminantes) con el objetivo de reducir volumen y a la espera de una posible comercialización. Claramente esto constituye problemas como la ocupación espacio y posibles emisiones al aire del material y que, quien adquiera este plástico reciclado como materia prima para incorporarla en otro sistema, estará ingresando un material con un elevado potencial dañino.

Cabe nombrar el caso de universidades como la Universidad de La Plata en conjunto con organizaciones sociales que desarrollan bloques de construcción con material plástico que no puede ser correctamente clasificado pero que aún no han logrado ser homologados [20]. Al mismo tiempo, la Universidad ha desarrollado informes en donde se evidencia que en estos plásticos la presencia de BFRs es inevitable [113] y que el ABS y el HIPS son los que, en mayor frecuencia contienen el compuesto por lo que estos plásticos presentan un gran desafío para ser reciclados por métodos mecánicos.

El reciclado mecánico consiste en una serie de pasos como corte, separación de contaminantes, separación de plásticos, molienda, lavado y secado para remover partículas de pegamento [104]. Como se dijo anteriormente, el plástico de los RAEE requeriría de un lavado especial con solventes que limpien el material [23] incrementando el costo y complejidad del proceso.

El reciclaje químico consiste en una despolimerización química o térmica, en ausencia de aire o en presencia de glicol o metanol [104], que tiene el objetivo de convertir los plásticos de RAEE en combustibles o en materias primas para refinerías. Estudios sobre la conversión de plásticos en la producción de combustibles [114]–[117] indicaron que los métodos de reciclaje de materias primas, como la co-pirólisis y la pirólisis catalítica resultan técnicas prometedoras para convertir los residuos plásticos puros y simples como PP, PE, PS y PVC en combustibles

Respecto a los plásticos de RAEE, la pirólisis es considerada una de las mejores opciones para el tratamiento de los mismos; debido a que consume solo el 10% de su contenido energético [118] [119] [108], pero igualmente puede provocar contaminación por sustancias cancerígenas, como son los furanos polibromados (PBDD/fs) y compuestos organobromados que dificultan su reutilización [5], [30], [120]–[123]. Se deben por lo tanto desarrollar procesos de deshalogenación durante la pirólisis para obtener así aceites no contaminados [124].

Otra de las opciones para el manejo de RAEEs es la recuperación de energía. El alto valor energético de los polímeros presentes en los residuos, se aprovecha para la generación de energía mediante la incineración de los mismos. De todas maneras, existen normas medioambientales para la incineración y co-incineración de RAEEs emitidas por la UE (Unión Europea) que previenen la liberación de sustancias químicas tóxicas al ambiente durante los procesos de quemado, evitando así los daños a la salud que la quema incompleta o deficiente de materiales de desecho genera [71] como por ejemplo el mantenimiento de una temperatura mayor a 850° durante un tiempo de residencia prolongado [125].

De todas maneras, no es el plástico de RAEE la mejor opción para una recuperación energética, ya que durante la combustión se generan compuestos volátiles orgánicos, humo, metales en forma de partículas, hidrocarburos aromáticos policíclicos, y dioxinas, entre otros que son perjudiciales y contaminan el ambiente [104], esto sumado a que al ser un material heterogéneo se torna compleja la identificación de posibles emanaciones.

Existen casos en que el residuo no es desechado mediante una recogida formal. En estos casos el propietario de los mismos los arroja junto a los residuos domésticos convencionales; perjudicando así toda la cadena de reciclaje. Los residuos se tratan en conjunto, se desechan en basurales o rellenos sanitarios convencionales o se incineran. Esto como se mencionó anteriormente es altamente perjudicial para el ambiente y personas que consumen y habitan la zona. En los países del primer mundo sí existen métodos formales, estandarizados, legalizados y cuidados para la recogida, separación y tratamiento de RAEEs. Generalmente, luego de la separación las partes metálicas y plásticas se recuperan y comercializan. Sin embargo, no está comprobado en estos casos que los plásticos se descontaminen previo a la comercialización.

Finalmente, el caso de los países en desarrollo como Argentina, donde se llevan a cabo procesos de recogida y separación al margen del sistema oficial; trabajadores autónomos se dedican a la recolección de RAEEs para su desmantelamiento y posterior reventa de partes o bien, reparación para ser usados nuevamente. Este reciclaje informal y manual genera, como dijimos, graves daños en la salud de los trabajadores [19].

Es necesario entonces, llevar a cabo un proceso de reciclaje que considere la existencia de componentes metálicos, aditivos bromados y emanación de sustancias químicas tóxicas que los RAEE generan. Que considere los costos económicos y requerimientos técnicos que conllevan los procesos de separación y purificación de contaminantes y a la vez, confiera seguridad y salubridad tanto, para quienes reciclan el residuo como para quienes usan el objeto fabricado con materia prima reciclada.

## 2.6. La Sustentabilidad

El concepto de sustentabilidad surge a medida que avanza la tecnología y el desarrollo económico. El informe Brundtland, elaborado por distintas naciones en 1987 para la Organización de la Naciones Unidas (ONU) define la sustentabilidad como: “El desarrollo que satisface las necesidades del presente, sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las propias”.

Otra definición es la del simposio de Oslo en 1994, que define el consumo sostenible como: “El uso de bienes y servicios que responden a necesidades básicas y proporcionan una mejor calidad de vida, al mismo tiempo minimizan el uso de recursos naturales, materiales tóxicos y emisiones de desperdicios y contaminantes durante todo el ciclo de vida, de tal manera que no se ponen en riesgo las necesidades de futuras generaciones”.

En base a la problemática planteada, han surgido a nivel mundial diversas acciones y conceptos que derivan de una preocupación mundial e intención de dar un fin o un cierre a este círculo vicioso o, mejor dicho, sistema lineal de consumo. Una de las acciones y la más importante a nivel mundial es la creación de los “Objetivos de Desarrollo Sostenible”.

### 2.6.1. Los objetivos del Desarrollo Sostenible

En 2015 se aprobó la Agenda 2030 sobre el Desarrollo Sostenible. La Organización de las Naciones Unidas, una organización que cuenta con 193 Estados Miembros y constituye un lugar de asamblea, debate, en donde todas las naciones del mundo cuentan con la oportunidad de reunirse, compartir problemáticas y buscar soluciones en conjunto, aprobó una serie de objetivos que deben cumplirse para mejorar la vida todos los habitantes de este planeta. La Agenda cuenta con 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible, que incluyen desde la eliminación de la pobreza hasta el combate al cambio climático, la educación, la igualdad de la mujer, la defensa del medio ambiente o el diseño de nuestras ciudades.

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible constituyen un sistema integrado, ya que la intervención en uno de ellos afecta indefectiblemente a otras.

A continuación se define cada uno de ellos.<sup>1</sup>

1. **Fin de la pobreza:** poner fin a la pobreza, en todas sus formas, en todo el mundo.
2. **Hambre cero:** poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria y la mejora de la nutrición. Promover la agricultura sostenible.

---

<sup>1</sup> En <https://www1.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals.html>

3. **Salud y bienestar:** garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades.
4. **Educación de calidad:** garantizar una educación inclusiva, equitativa y de calidad, promover oportunidades de aprendizaje durante toda la vida para todos.
5. **Igualdad de género:** lograr la igualdad entre los géneros y empoderar a todas las mujeres y las niñas.
6. **Agua limpia y saneamiento:** garantizar la disponibilidad de agua, su gestión sostenible y el saneamiento para todos.
7. **Energía asequible y no contaminante:** garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos.
8. **Trabajo decente y crecimiento económico:** promover el crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible, el empleo pleno y productivo y el trabajo decente para todos.
9. **Industria, innovación e infraestructura:** construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible y fomentar la educación.
10. **Reducción de las desigualdades:** reducir la desigualdad en y entre países.
11. **Ciudades y comunidades sostenibles:** lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles.
12. **Producción y consumo responsables:** garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles.
13. **Acción por el clima:** adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.
14. **Vida submarina:** conservar y utilizar en forma sostenible los océanos, los mares y los recursos submarinos para el desarrollo sostenible.
15. **Vida de ecosistemas terrestres:** gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras y detener la pérdida de biodiversidad.
16. **Paz, justicia e instituciones sólidas:** promover sociedades justas, pacíficas e inclusivas.
17. **Alianzas para lograr los objetivos:** revitalizar la alianza mundial para el desarrollo sostenible.

De los Objetivos de Desarrollo Sostenible se desprenden conceptos muy conocidos y estudiados en la actualidad. De “Producción y consumo responsables”, que tiene que ver con lograr un sistema productivo que se nutra de los desechos factibles de ser reusados para así evitar su destino en la tierra y en el agua y la vez generar conciencia en los consumidores del daño que genera el uso lineal de los productos que se adquieren –“usar y tirar”; se desprende el concepto de economía circular.

#### 2.6.2. La Economía Circular

El concepto economía circular responde a una transformación en la manera de producir y consumir. Propone transformar el sistema lineal en circular, empleando recursos que provengan de los desechos del mismo proceso o de otros procesos y para esto se necesita que al consumir, los desechos provenientes del fin de vida de los objetos (ya sea por obsolescencia real o programada) vuelvan de alguna manera al ciclo productivo como materias primas de otros productos evitando así la generación de residuos que contaminan el planeta y la extracción de recursos naturales.

Ken Webster, economista promotor de la economía circular, citado en el artículo de Morocho y col.[126] presenta los principales estándares de la economía circular;

- Diseñar sin residuos: desarrollar un concepto de diseño que contemple que los componentes del producto, naturales o artificiales tengan la capacidad de adaptarse luego a otro proceso mediante el diseño para el desmontaje, readaptación, diseño del fin de vida, etc.
- Aumentar la resiliencia: maximizar la eficiencia y el rendimiento de los componentes diseñando elementos adaptables a factores externos.

- Uso de energías renovables: priorizar el uso de este tipo de energías.
- Pensar en sistemas: entender a los productos como sistemas interdependientes que se retroalimentan constantemente.
- Pensar en cascada: generar productos con valor agregado.

La Economía Circular entonces, supone un cambio de paradigma, el traspaso de los sistemas lineales de producción y consumo a un sistema circular y constantemente retroalimentado por sí mismo de manera que dicho proceso no genere impactos secundarios en el ambiente. En la Figura 2. 5 se muestra el sistema planteado tanto para la producción de energía como para la producción de objetos de consumo.

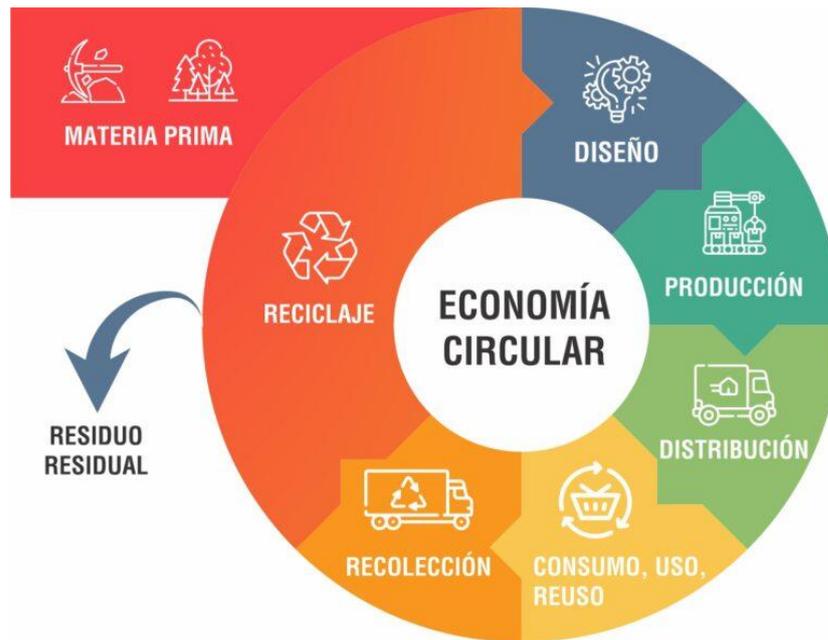


Figura 2. 5: Esquema del flujo de la Economía Circular [127]

Para funcionar, el sistema propone que las personas, desde sus casas separen los residuos de manera tal que sean fácilmente recolectados por los agentes correspondientes para ser usados en la industria. Más del 40% de los residuos son reciclables. Tanto los plásticos como el cartón, el papel, el vidrio entre otros, son muy valiosos para desarrollar luego productos como muebles, fibras textiles, partes de automóviles, componentes constructivos, etc. Y de desecharse junto a desechos orgánicos pierden toda su potencialidad para ser recuperados. Una vez desechados correctamente, los recuperadores urbanos pueden separar fácilmente los residuos por tipo y así destinarlos a la planta productora correspondiente. Otro concepto que se desprende del de Economía Circular y que está siendo aplicado en la actualidad es el de "infrarreciclaje". El infrarreciclaje o "downcycling" en inglés. Hace referencia a los procesos de reciclaje en lo que resultan nuevos productos de menor calidad y funcionalidad que la del material original. Por su parte la norma ISO 14044 [128] relativa al Análisis de ciclo de Vida se refiere a los ciclos abiertos y cerrados, pero no hace referencia al downcycling o su antagónico, upcycling. Define entonces que el ciclo de reciclado es cerrado cuando "el material de un sistema de producto se recicla en el mismo sistema de producto" y abierto; cuando un material se recicla incorporándose en otro ciclo productivo. Estos sistemas no tienen relación directa con el downcycling o el upcycling, estos conceptos se relacionan

específicamente con los cambios en las propiedades inherentes del material reciclado. Cuando el reciclaje es cerrado o abierto, pueden o no, cambiar las propiedades inherentes del material [129].

El reciclaje de ciclo abierto presenta la capacidad de extender el ciclo de vida, reducir el consumo de materias primas, de energía, emisiones de gases efecto invernadero, contaminación del aire, agua y extracción de recursos mediante la incorporación de materias primas recuperadas en nuevo ciclo productivo diferente a la inicial.

Tanto la separación en origen como los recuperadores urbanos, constituyen puntos clave para un sistema de reciclado factible. En la Figura 2. 6, se muestran imágenes representativas de este sistema; los contenedores diferenciados que resultan clave para el posterior de los empleados de las plantas de separación y clasificación de residuos.



*Figura 2. 6: contenedores de basura diferenciada y trabajadores en plantas de reciclaje de residuos.*

### 2.6.3. La Construcción Sostenible

Podemos definir entonces a la construcción sostenible como aquella que posee especial respeto y compromiso con el ambiente, mediante un uso eficiente del agua, la energía y los recursos materiales [130].

Esta tesis adhiere a principios básicos de la construcción sostenible, como son el reciclado de residuos y el uso de materiales recuperados, restaurados o combinados para la construcción de viviendas o edificios de manera eficiente, es decir, empleando la menor cantidad posible de materia prima virgen para conseguir el mismo fin.

Se aplicarán estos principios con la premisa de generar materiales con recursos recuperados y combinados para ser empleados en componentes constructivos o en construcción de manera directa. Los materiales compuestos se obtienen al unir dos materiales para conseguir una combinación de propiedades como rigidez, resistencia, peso, rendimiento a altas temperaturas, resistencia a la corrosión, dureza o conductividad, es decir, propiedades que no son posibles de obtener en los materiales originales [131]. En los polímeros se usan aditivos no sólo para mejorar sus propiedades, sino también, para reducir costos al disminuir el uso del polímero [131] sea éste, un polímero reciclado o no.

### 2.7. El uso de desechos plásticos en la construcción

La incorporación de los residuos sólidos plásticos en materiales de construcción ha sido estudiada como alternativa sostenible de la construcción tradicional. Mediante este método, los plásticos reciclados

pueden ser re-usados sin que se comprometa su calidad y en reemplazo de materiales vírgenes [13]. Existen antecedentes del uso de desechos de polímeros reciclados en materiales compuestos para la construcción, un ejemplo es el del uso de polipropileno y polietileno de alta densidad como matriz polimérica reforzada con fibras naturales. Esto genera un material dúctil y liviano que puede ser usado como madera plástica [132]. Por otro lado, estudios de rigor científico, han caracterizado el HIPS y el ABS provenientes de RAEE y luego han realizado muestras con distintos materiales ligantes para estudiar la compatibilidad de polímeros [133][34].

Numerosos trabajos han incursionado en el reciclado de plásticos con otros aditivos para generar nuevos materiales. Este es el caso de la madera plástica [134] se trata de un compuesto con la mezcla de PVC, PP, polvo de maderas y otros aditivos que posee buenas propiedades en términos de baja absorción de humedad, baja densidad, resistencia al ataque biológico, buena estabilidad dimensional, rigidez y resistencia [104].

Se desarrollaron también, trabajos con la combinación de materiales plásticos reciclados como PEAD reciclado y PP reciclado con aserrín de madera como relleno. Esta mezcla tuvo como resultado una excelente estabilidad dimensional, comparable con las muestras con material virgen. La absorción de agua e hinchamiento de espesor están relacionados al aserrín, no tiene relación con el uso de material plástico virgen o reciclado. Lo mismo sucede con la resistencia a la flexión y la tracción las cuales aumentan con la disminución de aserrín en la mezcla [135].

Por su parte, en el Centro Experimental de la Vivienda Económica (CEVE) se han desarrollado componentes constructivos con el reciclado de residuos plásticos y otros aditivos, entre ellos, las tejas de caucho sintético [136] y los ladrillos de PET [137] [138]. El CEVE es un centro de investigación, experimentación, desarrollo y transferencia de tecnologías de construcción y gestión integral, destinadas a la satisfacción de necesidades habitacionales con destino social. Los pilares en los que se asientan todos los proyectos que el CEVE desarrolla son los de Economía Circular y Desarrollo Sustentable. Existen grupos de personas en el CEVE que se especializan cada uno en las diferentes etapas requeridas durante el desarrollo de un material o componente constructivo. En lo que respecta a diseño y fabricación, el grupo Nuevos Materiales, en donde confluyen los conocimientos y experiencias de profesionales de la química, la arquitectura, la ingeniería y el diseño, es en donde se realizan estos trabajos. En la Figura 2. 7 se muestra un gráfico conceptual que resume la metodología de trabajo. Se parte de una problemática ambiental como la acumulación de un residuo específico en un medio abierto, cerrado, público, privado, en contacto con personas o no, por ejemplo, plásticos provenientes de los desechos de producción de una industria, neumáticos en desuso, maderas o virutas, etiquetas, RAEEs, etc. Con el objetivo de convertirlo en materia prima se procede a iniciar el proceso tecnológico propio de la Institución que busca obtener componentes constructivos que funcionen a nivel **técnico, ambiental, social y económico**. Una vez obtenido el prototipo, el grupo de Nuevos Materiales, busca la transferencia del mismo, es decir lograr que las soluciones tecnológicas lleguen efectivamente a las comunidades que lo necesiten de manera directa o a través de municipios, empresas privadas, Organizaciones no gubernamentales (ONG), etc. quienes adquieren por parte del grupo el *know how* del componente para poder producirlo en serie con los propios medios. El proceso es circular y de ciclo abierto es decir que busca que los residuos que se transformaron en materia prima vuelvan a hacerlo una vez llegado al fin de vida del producto la mayor cantidad de veces que sea posible.

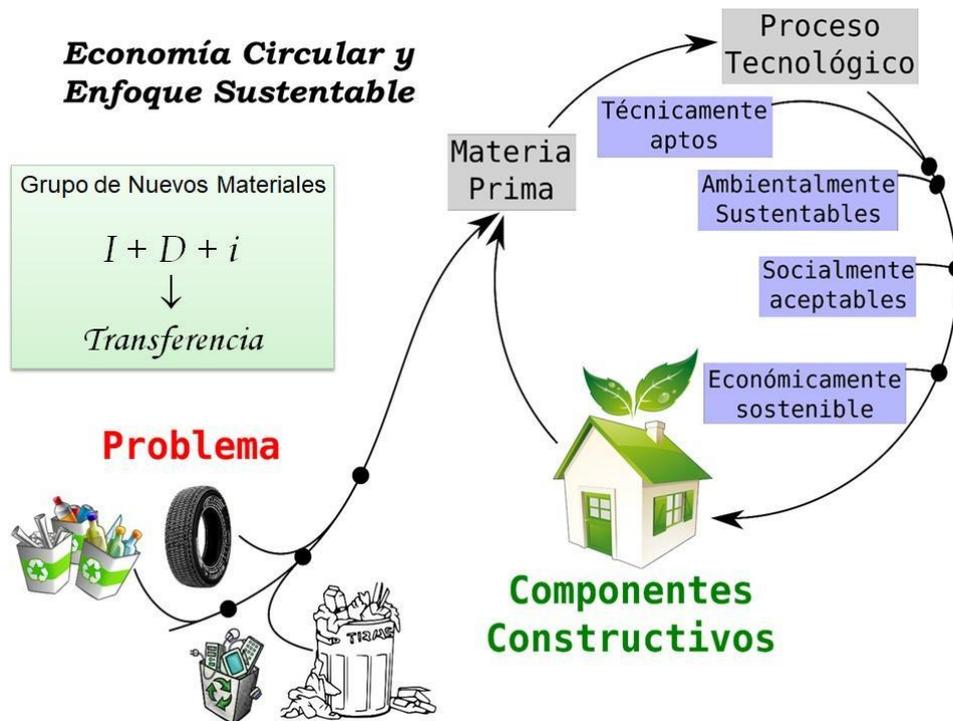


Figura 2. 7: Proceso en el cual se basan todos los proyectos del CEVE.

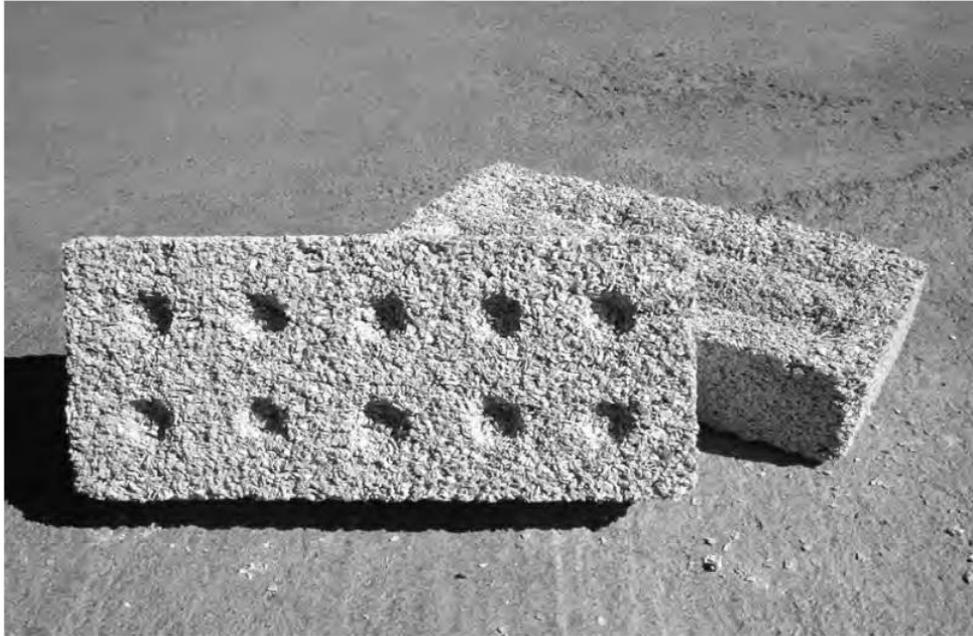
Respecto al objetivo de factibilidad técnica, el Instituto busca que todos sus proyectos lleguen a alcanzar el Certificado de Aptitud Técnica (CAT), un certificado que avala los componentes en cuanto a su comportamiento físico, mecánico, de trabajabilidad, desempeño bioclimático, durabilidad, entre otras pruebas y finalmente autoriza o no, la producción del componente en el territorio nacional y su aplicación en viviendas destinadas al uso por personas. Esta certificación es otorgada por la Secretaría de Vivienda y Hábitat, dependiente del Ministerio del Interior, Obras Públicas y Vivienda de la Nación.

Los ladrillos de PET son, como se dijo, uno de los trabajos del grupo que mayor alcance y relevancia ha alcanzado, al mismo tiempo que ha podido ser desarrollado y aplicado directamente en viviendas, construcciones civiles y es una tecnología sencilla y apropiada que ha podido ser desarrollada por comunidades y municipios de Argentina. Propone un método novedoso en la fabricación de elementos constructivos a partir del reciclado de un material de costo muy bajo que proviene de botellas de gaseosas descartadas que, luego de procesos de trituración es incorporado en mezclas cementicias dando como resultado un hormigón liviano que permite el reemplazo de una tecnología muy arraigada en la sociedad latinoamericana para la construcción de viviendas, como es la mampostería de ladrillo común de tierra cocida. Se trata de una alternativa ecológica porque el proceso de elaboración de los elementos constructivos no es contaminante del medio ambiente al tiempo que al recuperar y reciclar parte de unos desechos cada vez mayores, permite reducir la producción de residuos y la contaminación en las grandes ciudades [139]. Algunos momentos del proceso productivo [140] se muestran en la Figura 2. 8.



Figura 2. 8: Proceso de fabricación de ladrillos de PET .

La tecnología fue patentada por el CONICET (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas) y cuenta con el CAT. La obtención de este certificado autoriza el uso de los ladrillos de PET Tipo Block o convencional, [141] en viviendas como componente constructivo de función no portante. Las dimensiones del ladrillo convencional que se desarrolló son las siguientes: 26 x 12 x 6 cm, equivalentes a las del ladrillo convencional de barro cocido (Figura 2. 9). Las propiedades técnicas del mismo se detallan en la Tabla 2. 1 y en la Figura 2. 10, se muestra otra de las tipologías propuestas, el ladrillo tipo Block [141].



*Figura 2. 9: Ladrillo de PET tamaño convencional.*



*Figura 2. 10: Ladrillo de PET tipo Block.*

Tabla 2. 1: propiedades del ladrillo de PET.

Propiedad	Unidad	Ladrillo de PET
Peso específico	Kg/m <sup>3</sup>	1150
Conductividad Térmica	w/mk	0,5
Resistencia a la compresión	MPa	2,00
Absorción de agua	%	19,1
Tensión de adherencia	MPa	0,25
Resistencia acústica en un muro de 0,15 m de espesor revocado de ambos lados	dB	41
Resistencia al envejecimiento		Resistente a la acción de rayos UV y humedad
Permeabilidad al vapor de agua	g/mhkPa Clase	Entre 1,76 y 3,81 x 10 <sup>-2</sup> ± 4%
Resistencia al fuego		Clase RE 2 Material combustible de muy baja propagación de llama
Adherencia de revoques	mPA	0,25
Resistencia al corte y aserramiento		Fáciles de cortar y aserrar

Entre sus propiedades técnicas, resultan favorables las relacionadas con el peso específico y la conductividad térmica, el mampuesto resulta un material aislante factible de ahorrar energías convencionales durante el uso ya sea tanto para calentar o refrigerar ambientes. No así con la resistencia a la compresión. La norma de aplicación para este tipo de construcciones CIRSOC 501 [142], especifica una resistencia de 5 MPa para los ladrillos en función portante, con lo cual el uso de los ladrillos de PET se limita a cerramientos. En la Figura 2. 11, se muestran los ladrillos de PET aplicados en una vivienda como material de las paredes y su correspondiente estructura portante [140].



*Figura 2. 11: Vivienda modelo construida con ladrillos de PET.*

De manera general en morteros con agregados plásticos, el tamaño, forma y superficie de las partículas influye de manera significativa e impacta directamente en la resistencia a la compresión [143]–[145], debido a la baja adherencia entre el plástico y el cemento y la naturaleza hidrofóbica del polímero que

interfiere en el comportamiento del agua dentro de la mezcla [146]. Para mejorar las propiedades mecánicas, el grupo de Nuevos Materiales desarrolló una tecnología cuyo objetivo fue el mejoramiento de las propiedades morfológicas que luego se traducen en propiedades mecánicas de los ladrillos de PET mediante la adición de material inorgánico de particulado fino proveniente de desechos de porcelanato para rellenar los sitios intersticiales, como factor de incremento de la resistencia a la compresión [137]. Se lograron resultados positivos con una mejora en la resistencia a la compresión de 98%. Aunque no se alcanzó el valor requerido por la norma para mampuesto portantes se logró una mayor seguridad en el uso general de los ladrillos.

El trabajo de Gaggino y col. [147] es uno de los principales antecedentes que responde a los Objetivos de Desarrollo Sostenible debido a que busca promover la economía circular incorporando un residuo con buenas propiedades técnicas en un nuevo ciclo productivo, la tecnología constructiva desarrollada es simple, económica y no contaminante, genera viviendas y empleo dignos para todas las personas; la autora propone el concepto de la “Auto-construcción” [141] que lo define como un *“proceso autónomo a través del cual la propia gente encara la solución de su problema habitacional, en general con pocos recursos materiales y marco institucional insuficiente o ausente”*.

El trabajo además es un antecedente principal para este trabajo no sólo por la incorporación de un residuo revalorizado en un ciclo productivo si no por la incorporación de nuevos paradigmas en producción que se sintetizan en el concepto de tecnología apropiada abordado por Roland Sultz [148].

*“Una tecnología constructiva se considerará apropiada si no requiere grandes gastos de energía, no causa desechos ni contaminación, es climáticamente aceptable, segura frente a inclemencias de tiempo y peligros naturales, emplea fuerza laboral local tanto para la producción como para el mantenimiento y reparación, resulta socialmente aceptable, usa materiales locales (abundantes, renovables, disponibles, de poco peso y fácil manipulación, durables y de calidad), es socialmente aceptable, evita herramientas o equipos de alto costo, requiere baja especialización, fácil aprendizaje, ... y tiene escasa incidencia sobre el medio”*

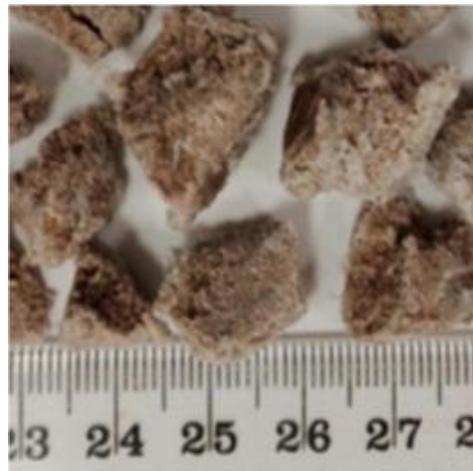
## 2.8. La incorporación de RAEEs y plásticos de RAEEs en la construcción

A nivel internacional, respecto a la incorporación de la fracción plástica de RAEEs en morteros en reemplazo del agregado natural, diversos estudios arrojan ventajas y desventajas respecto a sus propiedades mecánicas. En uno de estos estudios, las ventajas son flexibilidad, capacidad de ajuste, naturaleza liviana, resistencia y durabilidad en productos químicos, propiedades aislantes de temperatura y electricidad, bajo costo de producción. Las desventajas son propiedades cohesivas deficientes que conducen a una baja resistencia a la compresión, un módulo de elasticidad y durabilidad general del hormigón reducidos y un punto de fusión relativamente bajo [36]. También se estudiaron los porcentajes de plástico de RAEE reciclado óptimos para lograr un material con propiedades aptas para la construcción; se reportó que con un contenido del 10% de plástico de RAEE con una relación agua/cemento de 0,5 se logra estabilidad y buena resistencia a la compresión, a medida que el porcentaje se va incrementando hasta alcanzar el 30% disminuyen la resistencia a la compresión y la durabilidad del concreto [149]. Esto, podría atribuirse a la naturaleza hidrófoba del plástico y, como se mencionó anteriormente, a su baja cohesividad con el cemento [150]. Los porcentajes de reemplazo para mantener las propiedades de resistencia óptimas varían del 2,5%, 4%, 10% hasta 15% según autores diversos [150]–[153].

Otros resultados, presentados por diversos autores plantean que el peso total del mortero disminuye al agregar plástico reciclado, lo que se traduce en una menor resistencia a la compresión y tracción [153].

En síntesis, Shamili y col. [25], concluyen que la incorporación de plásticos de RAEE en morteros de cemento reduce el peso total de la pieza fabricada con el mortero, la trabajabilidad decrece con el incremento de RAEE, al mismo tiempo que se afectan sus propiedades mecánicas.

Alqahtani y col. [147], desarrollaron recientemente un agregado sintético para su uso en concreto. Este material compuesto consiste en un relleno inorgánico encapsulado en el polímero de plástico reciclado. El agregado sintético incluyó polietileno de baja densidad (LDPE) triturado reciclado y el relleno (arena roja, cenizas volantes o finos de cantera) en 30% y 70%, respectivamente [154]. Este agregado sintético se preparó en varios pasos mezclando plástico con el relleno para formar una mezcla homogeneizada, comprimiendo la mezcla en un molde, fundiendo el plástico para formar una lámina o losa compuesta y triturando la lámina o losa compuesta Figura 2. 12.



*Figura 2. 12: Desarrollo de agregado sintético grueso por Alqahtani y col. [154]*

El agregado desarrollado es liviano, con una densidad que oscila entre 510 y 750 kg/m<sup>3</sup> y un valor de absorción de agua de 2,7 a 9,8%. Se utilizaron varias proporciones de APR en morteros de hormigón y se examinaron las propiedades resultantes del hormigón fresco y curado. Los autores informaron que el reemplazo del 100% del agregado liviano convencional con APR mostró una reducción de aproximadamente un 13% en la penetración de cloruros. Además, se redujo la resistencia a la compresión y se reportaron valores entre 14 y 18 MPa. En el análisis de espectroscopía de barrido electrónico (SEM) se evidencia claramente que el material hecho con finos de cantera se adhiere más fuertemente a la matriz cementosa de hormigón que el hormigón con agregado sintético hecho con cenizas volantes. Además, los autores observaron que la mezcla de concreto liviano convencional tenía una falla por fragilidad, mientras que la mezcla de concreto que incorporaba árido sintético mostraba un comportamiento dúctil posterior al pico [154]. Finalmente, los autores propusieron su uso para la preparación de elementos no estructurales como edificación de laterales bajos, relleno cementoso y pavimentos.

## 2.9. Estabilización por Solidificación en matriz cementicia

Como ya se mencionó, los plásticos de RAEE contienen residuos metálicos y orgánicos en su composición y existen antecedentes sobre el uso de cemento para llevar a cabo procesos de estabilización por solidificación (S/S por *stabilization/solidification* en inglés) de este tipo de contaminantes.

La tecnología de S/S de residuos, es un proceso para reducir la peligrosidad de los mismos, formando un material monolítico que permite restringir el área superficial expuesta a los agentes del ambiente [155] y que ha sido reconocido como un proceso de tratamiento de residuos peligrosos seguro y eficiente [156]. Se comprobó que el elevado pH del cemento permite retener los metales bajo la forma de hidróxidos insolubles o carbonatos dentro de la misma estructura endurecida [157]. También arcillas orgánicamente modificadas, bentonita [153] y carbón activado han sido estudiados como componente para la adsorción de contaminantes orgánicos en procesos de S/S [158]. Para llevar a cabo un proceso de S/S es importante tener en cuenta la forma en que ingresa el material plástico a las mezclas cementicias; una partícula de plástico con forma angular y esquinas agudas disminuye el valor de asentamiento del componente, por lo tanto, el agregado con forma esférica disminuye la fricción interna entre el mortero y la partícula, dando como resultado un mayor valor de asentamiento [146].

Los plásticos provenientes de RAEE pueden reciclarse e incorporarse en mezclas que mejoren las propiedades que se vieron reducidas al someterse al proceso de reciclado o como agregado para morteros u hormigones que mejore las propiedades de resistencia al impacto, fisura e impermeabilidad del material [159].

En los trabajos publicados sobre incorporación de plásticos de RAEEs en morteros de cemento u hormigones sólo Kumar y Baskar [160] consideraron el lixiviado de metales pesados en hormigones hechos plásticos de RAEEs como agregados mediante un análisis TCLP. En su trabajo, metales pesados tales como cadmio, cobre, zinc fueron analizados en mezclas de hormigón con diferentes porcentajes de reemplazo de árido natural por HIPS a diferentes edades; 28, 60 y 90 días. Los resultados arrojaron que, para estos metales la concentración estuvo por debajo del límite que regula la Norma RoHS [28]. Sin embargo en este trabajo, el antimonio; que se considera el metal pesado con mayor potencial dañino y mayor presencia en los plásticos de RAEE [3], [161]–[164] no fue evaluado por lo que se considera que el presente trabajo debe incorporar a este metal pesado como un condicionante determinante.

## 2.10. Conclusiones del capítulo

Las principales diferencias entre la situación de los RAEE en los países desarrollados y en los países en vías de desarrollo están relacionadas con complejidad tecnológica y la presencia de un marco legal adecuado. Más allá de que la situación en los países desarrollados no es del todo eficiente - algunos autores han reportado deficiencias en cuanto a su capacidad de reciclaje que los lleva a incurrir en la exportación del residuo a países subdesarrollados- en estos países es posible reinsertar, por ejemplo, plásticos de forma segura en otros procesos como la producción de plásticos secundarios debido a que se cuenta con la tecnología y el marco legal para tal fin.

En Argentina, dado que el sistema es mayoritariamente manual y no se cuenta con un marco legal nacional, es necesario apuntar a desarrollar modelos de procesos productivos que no requieran separación previa y al mismo tiempo sean seguros para la salud y el medio ambiente ya que, la mayoría de los RAEE terminan en vertederos o son reciclados de manera informal y particularmente, la FPR no puede ser reciclada debido a su heterogeneidad y su contaminación.

En relación a los Objetivos de Desarrollo Sostenible, uno de los objetivos que atraviesa esta tesis es "Industria, innovación e infraestructura". Generar un sistema constructivo o componente constructivo en base a plásticos reciclado de RAEE responde a este concepto que a la vez se relaciona con el de

“producción y consumo responsables”, “Acción por el clima”, “Vida submarina” y “Vida de ecosistemas terrestres” ya que se busca obtener un proceso que devuelva al ciclo productivo un residuo que, aparte de permanecer en el agua o en la tierra como los plásticos convencionales, obstruyendo los ciclos naturales y la biodiversidad, presenta una potencialidad de contaminación alarmante ya que se encuentra contaminada con metales pesados y aditivos orgánicos bromados que dañan directamente y gravemente la salud de las personas. Logrando entonces el objetivo de esta tesis se estaría arribando también de manera directa a un sistema de construcción sostenible que genere “Ciudades y comunidades sostenibles, energía asequible y no contaminante” y a la vez “Trabajo decente y crecimiento económico”. El primero de los objetivos responde a lograr mediante este trabajo un componente o sistema de componentes que logre neutralizar los componentes contaminantes de los polímeros que se emplean como materia prima y a la vez poder, mediante el uso del plástico, ahorrar consumo energético debido a la capacidad intrínseca conocida del material de aislación térmica.

Y respecto al trabajo decente y crecimiento económico se busca generar una tecnología sencilla, adaptable y económica factible de ser desarrollada por sociedades, municipios o cualquier grupo de personas que no posean conocimientos técnicos ni teóricos específicos. De esta manera se generaría trabajo y crecimiento para todas las comunidades que lo necesiten.

Frente a esto, las experiencias adquiridas por otros autores a nivel global sobre incorporación de plásticos de RAEE en matrices de cemento, más allá de que en estos se haya realizado una separación y descontaminación polimérica previas, acordes a la tecnología e infraestructura de los países en donde han sido desarrollados, resultan de gran utilidad para establecer comparaciones sobre desempeño mecánico y químico de componentes desarrollados.

Se concluye también que, los plásticos provenientes de los RAEE, siguen sin poder insertarse en un ciclo productivo determinado, que neutralice sus contaminantes, y se rija por los parámetros de sustentabilidad ambiental, económica y social.

Por otro lado, en los últimos diez años, en nuestro país, se emplearon aproximadamente 6 millones de toneladas de residuos como materias primas en la fabricación de cemento. Se utilizaron 296.000 toneladas como combustibles alternativos y 3,7 millones de toneladas de residuos como adiciones al cemento [165]. Por lo tanto, la reutilización de residuos en la construcción, resulta una de las aplicaciones más frecuentes. Debido al poder del cemento de neutralizar contaminantes metálicos, ya sea incorporando residuos en la industria cementera o en la composición de mezclas cementicias.

Con esta base teórica, este trabajo se centró en generar un material compuesto, sustentable e innovador utilizando la totalidad de la fracción plástica de RAEE en distintas matrices cementicias. Trabajos anteriores se han desarrollado ejecutando una separación previa por tipo de plástico en las muestras y luego aglutinándolos con diversos ligantes, poliméricos o cementicios. En este trabajo el desafío fue superar la necesidad de separación previa debido a los altos costos de mano de obra, maquinaria y tiempo que se requiere, tomando como condicionantes la presencia de contaminantes metálicos y compuestos orgánicos polibromados, teniendo en consideración las propiedades técnicas requeridas en la construcción y el cuidado del ambiente.

## CAPITULO 3. LA FRACCIÓN PLÁSTICA DE RAEE

En este capítulo se desarrolla una caracterización física y química de la FPR. En el apartado 3.1 se presenta una revisión bibliográfica sobre las características del material; composición polimérica, presencia de metales pesados y presencia de componentes orgánicos polibromados. En el apartado 3.2 se desarrolla un análisis del material que consiste en la caracterización física y química del residuo utilizado.

### 3.1. Análisis bibliográfico de la FPR

La Fracción Plástica de RAEE constituye un material potencialmente útil y valioso para ser recuperado y reincorporado en algún proceso productivo. Se trata de un residuo formado por una variedad heterogénea de plásticos. Dicha heterogeneidad depende de la corriente del residuo, del proveedor, de la geografía y hasta de las actividades económicas y tecnológicas que en la región de procedencia se desarrollen. Como toda mezcla, presenta irregulares propiedades mecánicas e impredecibles propiedades reológicas [23] por lo que, de pretender usarse directamente como material en construcciones requeriría de una separación previa y/o limpieza, así presentaría un alto potencial de reciclado que entre sus ventajas se encuentra la de evitar la producción de plásticos vírgenes provenientes de combustibles fósiles.



*Figura 3. 1: Residuo de plásticos de RAEE.*

Maris y col. [6] desarrollaron una caracterización química de un lote de RAEE de 10 toneladas divididas en dos lotes. Mediante dos tipos de análisis, en conjunto con laboratorios, usuarios y recicladores, y luego una clasificación, desmantelamiento y separación de metales se obtuvo la fracción plástica. La misma se trituró para finalmente analizar su composición polimérica. Se presenta en la Figura 3.2 el resultado del análisis FT-IR<sup>2</sup>. Mediante esta caracterización, los autores lograron definir que el principal polímero presente en el lote analizado era ABS, seguido por el HIPS y el PP.

---

<sup>2</sup> Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier.

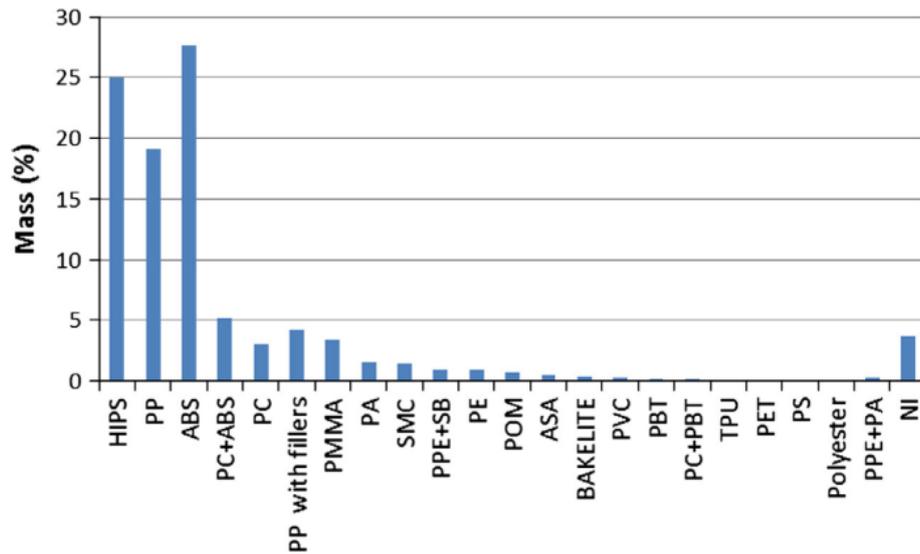


Figura 3. 2: Composición y distribución en masa de polímeros de la muestra representativa de fracción plástica de RAEE de Maris y col. [6].

Respecto a la densidad de las muestras, la misma fue determinada por el método de inmersión, resultando el HIPS, ABS y estireno acrilonitrilo (SAN) con densidades muy cercanas lo que hace entonces, que no puedan ser separadas bajo este método. PC y PC/ABS mantienen también densidades cercanas que coinciden algunas veces con PA, PP/ABS [6].

Peeters y col. [29] trabajaron también desde la densidad de los polímeros con el objetivo de determinar si es este un método factible de separación polimérica. Evaluaron 500 muestras de plásticos provenientes de carcasas de AEE y 18 provenientes de plásticos internos. Resultaron con mayor presencia y menor densidad los HIPS, con alrededor de 170 muestras y una densidad entre 1,03 y 1,10 g/cm<sup>3</sup>. Luego el ABS se presentó en unas 17 muestras y su densidad fue similar; entre 1,05 y 1,08 g/cm<sup>3</sup>. Las mezclas de PC/ABS se presentaron en aproximadamente 85 muestras y arrojaron una densidad significativamente mayor; de entre 1,19 a 1,45 g/cm<sup>3</sup>.

Dimitrakakis y col. [9] analizaron las corrientes de residuos provenientes de la ciudad de Dresde, Alemania con el objetivo de determinar materiales reciclables y sustancias peligrosas en RAEEs. La composición polimérica a la que arribaron mediante espectroscopia de reflectancia NIR<sup>3</sup> se presenta en la Figura 3. 3.

<sup>3</sup> Por sus siglas en inglés: *near-infrared*.

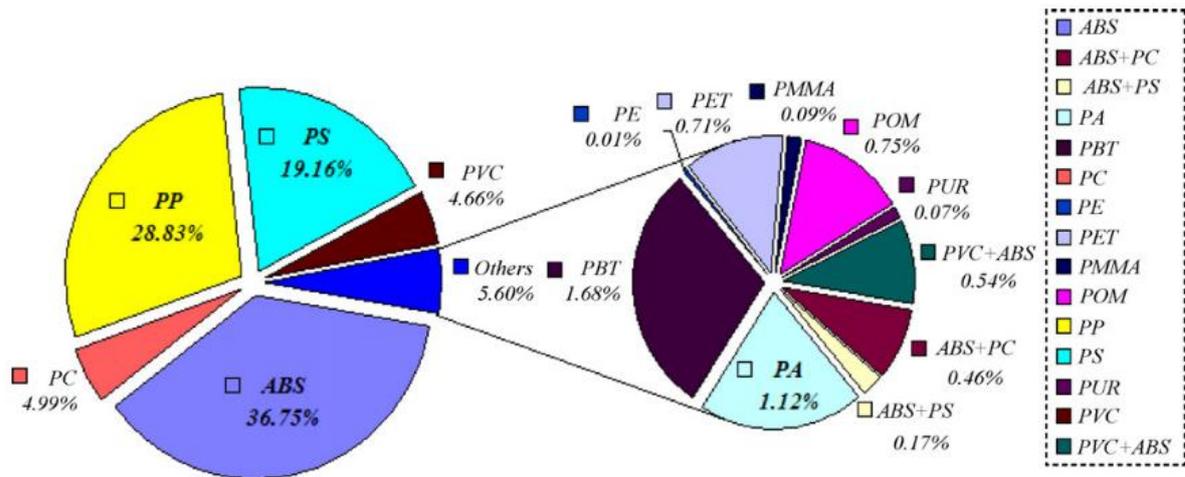


Figura 3. 3: Composición y distribución polimérica en masa de la FP- RAEE [3].

Los autores encontraron cerca de 15 tipos de polímeros en la FPR, siendo el ABS el que se presentó en mayor porcentaje, seguido por el PP y el PS. El PC y el PVC coincidieron con una presencia del 5%. Los polímeros restantes se encontraron en porcentajes entre el 0,01% (PP) y el 1,68% (PBT – Tereftalato de Polibutideno).

Por su parte, Schlummer y col. [30] mediante análisis FT-IR encontraron una baja variedad de tipos de polímeros en su muestra de 45 carcasas de electrodomésticos. Se encontró ABS en un 31%, HIPS en un 29% y luego menores cantidades de mezclas de ABS/PVC, ABS/PC y PPO (por *polyolefin oxide* en inglés) /PS. En la Figura 3. 4, puede verse el gráfico que los autores exponen en su artículo.

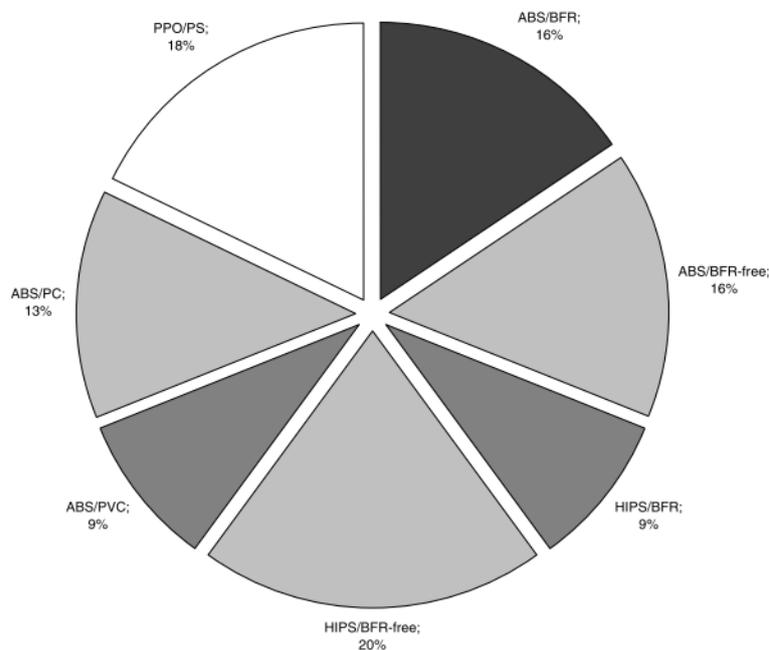


Figura 3. 4: Composición polimérica mediante FT-IR de 45 electrodomésticos [30].

Puede verse entonces que la heterogeneidad de la FPR se presenta en todas las muestras analizadas en los estudios presentados con anterioridad. Lo que constituye el primer condicionante importante frente al objetivo de este trabajo; generar un sistema sencillo de revalorización del residuo que no requiera procesos de separación, clasificación o limpieza previos de manera que se pueda implementar en

procesos de producción locales, donde en general el acceso a la tecnología sofisticada es costoso y muchas veces hace que los emprendimientos se tornen inviables.

Aparte de estas condiciones físico-químicas, el principal problema del residuo, objeto de estudio de esta tesis radica en que ciertas fracciones de plásticos de RAEE contienen sustancias peligrosas que requieren un tratamiento específico o, en algunos casos, la destrucción del mismo. Por ser estos aparatos alimentados por energía eléctrica que conlleva a un riesgo de potencial ignición, estos productos son vulnerables a la inflamabilidad y representan el mayor flujo de plásticos ignífugos [166]. Por lo que se le agrega a su composición, retardantes de llama (FR - *Flame retardants* por sus siglas en inglés). En promedio, el 26% en peso de todos los plásticos RAEE contienen FR [167] y, las carcasas de HIPS y ABS contienen FR a base de bromo (Br) y su concentración depende de la categoría del RAEE [168]. También, en la FPR pueden encontrarse metales pesados como plomo, (estabilizador y pigmento) cadmio (pigmento) y antimonio (aditivo sinérgico para retardantes de llama) [47].

El Antimonio (Sb) es un metal pesado que se utiliza principalmente en combinación con BFR por sus efectos sinérgicos, con un contenido típico de óxido de antimonio (III) ( $Sb_2O_3$ ) de 3-5% en peso en plásticos que contienen BFR [45] y una relación de  $Sb_2O_3$  a BFR generalmente entre 0,25 y 0,5. De todas maneras, estas relaciones varían según autores diversos. Wäger y col. [28], encontraron en todas las fracciones plásticas de RAEE estudiadas sustancias reguladas por la Directiva RoHS, sobre todo combinaciones de Sb:Br en una relación de entre 0,07 a 0,33. El número más bajo se encontró en carcasas de televisores de pantalla plana y los más bajos en plásticos mezclados de monitores de tubos de rayos catódicos (CRT) y televisores. Altas concentraciones de metales pesados, como cadmio y plomo se encontraron en mezclas de plásticos de pequeños electrodomésticos, equipos de tecnología y comunicación y equipos de consumo.

Turner y col. [169], investigaron los niveles de antimonio, bromo y cloro en productos de consumo de plástico en el Reino Unido. Los resultados fueron los siguientes: Electrónica 58%, Ropa-tapicería 39%, Interiores de vehículos 34%, Construcción-fontanería 30%, Ocio-deportes 25%, Oficina-papelería 22%, Juguetes-aficiones 15%, Limpieza- almacenamiento 9%, Alimentos-bebidas 6%. Total: 29%. Bromo y/o antimonio se presentaron en todas las categorías, incluidas las categorías en las que no se esperaban retardantes de llama. Los autores concluyen que muchos artículos domésticos poliméricos que no tienen ninguna razón para ser resistentes al fuego están contruidos, al menos en parte, a partir de componentes plásticos reciclados de productos electrónicos ricos en metales pesados. Hay dos fracciones que son muy críticas para ser recicladas; los plásticos mixtos de monitores CRT y televisores CRT [28].

Maris y col. [6] mediante fluorescencia de rayos X (XRF- *X ray fluorescence*, en inglés) en polímeros reducidos a polvo, determinaron las concentraciones de fósforo, cloro, antimonio, bromo, cromo, cadmio, plomo, óxido de magnesio, alúmina, silicato, carbonato de calcio y titanio. En el estudio no se detectó cadmio, sí se detectaron cromo y plomo en una concentración inferior al 0,1% en peso mientras que el bromo superó el 0,1% en todos los polímeros excepto el PC y PP sin relleno.

Dimitrakakis y col. [9], encontraron en un porcentaje pequeño de muestras: Cd, Pb, Br y Cr en concentraciones superiores a los límites permitidos. También encontraron Mercurio (Hg) pero que no excedió los límites establecidos. Los resultados para el Br y el Sb demostraron también que aproximadamente la mitad de los plásticos contienen retardantes de llama bromados, mientras que, en la mayoría de los casos, el  $Sb_2O_3$  se utilizó como sinergista. Estos resultados son precedidos por una separación manual de pequeños RAEEs, según procedencia del residuo, un desmantelamiento manual como herramientas sencillas para seleccionar luego los materiales poliméricos que serían analizados. Posteriormente, las piezas fueron pesadas, lavadas y molidas a igual tamaño y tamizadas. Finalmente, se

desarrollaron los respectivos análisis de fluorescencia de rayos X manual, espectrometría de absorción atómica (AAS) y cromatografía de intercambio iónico (IEC), según el metal a determinar. Pigmentos de cadmio fueron encontrados por Tamaddon y col. [8], en plásticos de ABS, pertenecientes a aparatos electrónicos de consumo masivo como televisores, computadoras, radios, etc. Stenvall y col. [10], encontraron hierro en niveles de hasta 700 ppm en tres lotes de plásticos de RAEE de diferentes orígenes mediante plasma acoplado inductivamente. Esto resulta en un problema debido al potencial de este metal para catalizar reacciones Redox<sup>4</sup> durante el procesamiento de fusión y, por lo tanto, acelerar la degradación de los plásticos durante el reciclaje. Metales tóxicos también fueron encontrados pero con valores por debajo de los límites establecidos por la Directiva RoHS (*Restriction of Hazardous Substances Directive*, en inglés) sobre restricción de sustancias peligrosas [91]. Haarman y col. [47], encontraron que la presencia de aditivos peligrosos varía notablemente en diferentes aparatos. Que las carcasas de RAEE generalmente no contienen metales pesados en concentraciones dañinas, pero sí BFRs en concentraciones nocivas, especialmente en algunas carcasas CRT. Respecto a los retardantes de llama bromados, estos representaron aproximadamente el 20% del consumo mundial de retardantes de llama en 2011, conformando uno de los mayores grupos [170]. Estudios realizados sugieren que el uso de BFR va en aumento: durante el período comprendido entre 1990 y 2000, el uso de BFRs se duplicó en todo el mundo, de 145 a 310 kilo toneladas [171]. Los BFRs se encuentran principalmente en aparatos electrónicos y conforman el 40% de todos los retardantes de llama que pueden encontrarse en un AEE [172]. Como se adelantó en la Introducción, los BFRs más comúnmente aplicados a aparatos electrónicos son el tetrabromobisphenol A (TBBPA) y los éteres de difenilo polibromados (PBDE) y la carga típica de Br para aplicaciones de retardantes de llama oscila entre el 4 y el 10% en peso, según el tipo de polímero y la capacidad de retardo de fuego que se requiera. Según Hennebert y col. [173], tanto el bromo, como los retardantes de llama bromados, como el trióxido de antimonio como sinergista, se encuentran en todos los plásticos de RAEE; por lo que la gestión de dicho residuo debe cumplir con todas las normativas que puedan existir en la zona de incidencia. Maris y col. [6], encontraron compuestos que contienen Br en la muestra de FPR mediante espectrometría IR y FRX. El Sb fue detectado sólo en muestras que contenían Br. El cloro (Cl) se detectó en pequeñas cantidades (por debajo del 0,1%) indicando la presencia de un retardante de llama clorado. El fósforo se detectó en cantidades considerables en el PC + ABS. Los polímeros en polvo analizados por este grupo no presentaron retardantes de llama con alúmina y magnesio. Taurino y col. [23], midieron BFR en RAEE en Italia en monitores de TV y computadoras personales y encontraron porcentajes de 0,02% y 4,39% en peso respectivamente. Gallen y col. [174], midieron bromo por fluorescencia de rayos X (XRF) en productos comerciales australianos y encontraron concentraciones de que excedían los 100 ppm de bromo en productos de base electrónica. Aldrian y col. [48], desarrollaron la medición bromo mediante el mismo método en 3006 monitores de TV y 1598 monitores de computadoras en Austria. Los plásticos de desecho de televisores mostraron un contenido de bromo de aproximadamente 0,7 – 0,8% en peso, mientras que las carcasas de monitores, 3,2% en peso. Los autores concluyeron que medidas de seguimiento son necesarias para este tipo de piezas con alta concentración de bromo, sobre todo en los monitores de computadoras. Los BFR son contaminantes orgánicos persistentes que pueden acumularse y detectarse en los seres humanos y el ambiente en zonas alejadas de los puntos de producción o consumo. Covaci et al. [52],

---

<sup>4</sup> Se denomina reacción de reducción-oxidación, óxido-reducción, o simplemente reacción redox, a toda reacción química en la que uno o más electrones se transfieren entre los reactivos, provocando un cambio en sus estados de oxidación.

encontraron en una síntesis realizada de diferentes estudios, que el hexabromociclododecano (HBCD), un hidrocarburo cíclico alifático bromado que se utiliza en aislantes térmicos para construcción, tapicería textil y electrónica, se encuentra en concentraciones más altas en muestras de aire, sedimentos o peces recolectadas cerca de las fuentes puntuales o directas (plantas que producen o procesan HBCD). También se midieron altas concentraciones en depredadores principales como mamíferos y aves rapaces por lo que los autores concluyen que existe la posibilidad de una biomagnificación<sup>5</sup>. Concentraciones más bajas resultaron en estudios con seres humanos.

Por su parte, Law y col. [175], detectaron una bioacumulación<sup>6</sup> de sustancias bromadas con diferencias en los factores según la sustancia estudiada. A la vez, Gustafsson y col. [176], encontraron que los PBDE presentan el mayor potencial de bioacumulación.

Meironyte y col. [177], analizaron la presencia de difeniléteres polibromados en leche materna durante 25 años y encontraron que ciertos PBDE tienen la posibilidad de acumularse, lo que constituye un problema serio ya que dichos contaminantes entonces serán transferidos al lactante.

Darnerud [178], resume en su artículo los efectos biológicos de los PBDE (éteres difenilos polibromados), TBBPA (tetrabromobisfenol A) y derivados, PBB (bifenilos polibromados) y HBCD (hexabromociclododecano). Respecto a los PBDE, se encontraron efectos como neurotoxicidad del desarrollo y alteraciones en la homeostasis de la hormona tiroidea para los PentaBDE, estudiados en ratones. Respecto a los OctaBDE, se observaron efectos tóxicos en las primeras etapas del desarrollo en conejos y en ratas. El DecaBDE se evidenció de manera modesta en estudios en ratas, generando hiperplasia tiroidea, agrandamiento del hígado y degeneración hialina en el riñón a 80 mg/kg de peso corporal. A 100 mg/kg se registraron reabsorciones fetales. En el estudio de carcinogenicidad de DecaBDE en ratas y ratones se observan adenomas y carcinomas, pero a dosis muy altas (1200 mg/kg de peso corporal/día y más).

Respecto al TBBPA, Darenrud encontró resultados de una baja toxicidad del compuesto en sus sistemas experimentales y concluye que por la falta de datos precisos sobre su toxicidad y la de sus derivados no se pueden brindar datos concluyentes sobre el riesgo de exposición al compuesto. Mientras que para el HBCD encontró que el compuesto no indujo reacciones cutáneas en pruebas con humanos y que los datos disponibles en animales, evidencian que los efectos críticos se encuentran en el hígado, con un aumento de su peso, una "fanerosis lipoidea" hepática y efectos sobre las hormonas tiroideas. Los estudios de mutagenicidad son negativos, lo que sugiere que el efecto carcinogénico, si lo hay, tiene un mecanismo epigenético.

Para el PBB, Darenrud encontró resultados de estudios en animales que demostraron que los efectos reproductivos y cancerígenos con las dosis administradas son más bajas.

Volviendo a los RAEE, existen trabajos que demuestran de manera cuantitativa la presencia de TBBPA en carcasas plásticas, Kousaiti y col. [179] encontraron valores de concentración de TBBPA en reproductores de CD y aspiradoras que oscilaron entre 754 y 1146 µg/kg que variaban según el tipo de plástico; 510-

---

<sup>5</sup> Biomagnificación: *fenómeno en el que la bioacumulación se transmite a través de la red trófica. Cuando un organismo es depredado, los contaminantes permanecen en el organismo depredador. De esta forma, la concentración de contaminantes aumenta al ascender en la cadena trófica* [286].

<sup>6</sup> Bioacumulación: *Proceso de acumulación de ciertos productos dentro de los organismos. Algunos metales pesados son acumulados por los organismos acuáticos. Es por eso que pueden encontrarse concentraciones muy altas de estos elementos químicos en tejidos biológicos, aun cuando se hallen extremadamente diluidos en el medio acuático circundante. Los grandes depredadores marinos, como por ejemplo los tiburones, pueden absorber grandes cantidades de mercurio u otros metales pesados a través de los peces que comen. Se conocen casos de intoxicación masiva por compuestos orgánicos de mercurio en peces, como la tragedia ocurrida en la bahía de Minamata en Japón en 1956 y 1958. En Argentina se han detectado concentraciones elevadas de metales pesados en tejidos de tiburones de la zona de Bahía Blanca.* <https://www.mendoza.conicet.gov.ar/portal/enciclopedia/terminos/Bioac.htm>

2515  $\mu\text{g} / \text{kg}$  en ABS y 55-3109  $\mu\text{g} / \text{kg}$  en PP. Por su parte Chen y col. [180] detectaron, mediante GC/MS<sup>7</sup> que las carcasas de teléfonos móviles no tenían BFR. No así las carcasas de computadoras, que contenían TBBPA. Los PBDE y derivados fueron detectados tanto en carcasas de televisores como de computadoras.

### 3.2. Caracterización de la FPR

Se presentan los resultados de los ensayos realizados a las muestras de FPR que se obtuvieron de un proveedor local en relación a forma y tamaño, composición polimérica, presencia de metales pesados, de contaminantes orgánicos bromados y productos de descomposición polimérica.

Las muestras de plástico de RAEE fueron provistas por la empresa Ecotech de la Ciudad de San Lorenzo, Provincia de Santa Fe, Argentina. La actividad de la empresa consiste en realizar la recepción de RAEE que proviene de otras empresas, instituciones o particulares. Se realiza un desmantelamiento y clasificación de partes del residuo y, a través de diferentes procesos, se disponen las partes contaminadas o residuos peligrosos y se recuperan subproductos factibles de ser reingresados al circuito productivo como materia prima de diferentes industrias. El material fue provisto triturado a la granulometría solicitada para este proyecto.

El material triturado constó de dos lotes, cada uno con granulometrías diferentes, una denominada FPR#3 y otra denominada FPR#8. El lote FPR#3 fue triturado con una salida de la máquina trituradora de 3 milímetros en la empresa de tratamiento de RAEE y el lote FPR#8 fue triturado con una salida de la máquina trituradora de 8 milímetros en la empresa de tratamiento de RAEE. Sobre estas partículas se realizaron los análisis mencionados, cuyos procedimientos y resultados se detallan a continuación.

#### 3.2.1. Caracterización Física

Los parámetros de forma de RAEE fueron determinados mediante toma de imágenes con una cámara digital Motic 1.3MP y un microscopio Arcano XTJ5400D, 20x-40x. Luego, la imagen obtenida fue procesada en el software libre Image J 1.49. El software trabaja binarizando la imagen y, en base a una escala que debe señalarse en el mismo, calcula los parámetros de relación de aspecto, circularidad, redondez, área entre otros. (Figura 3. 5)

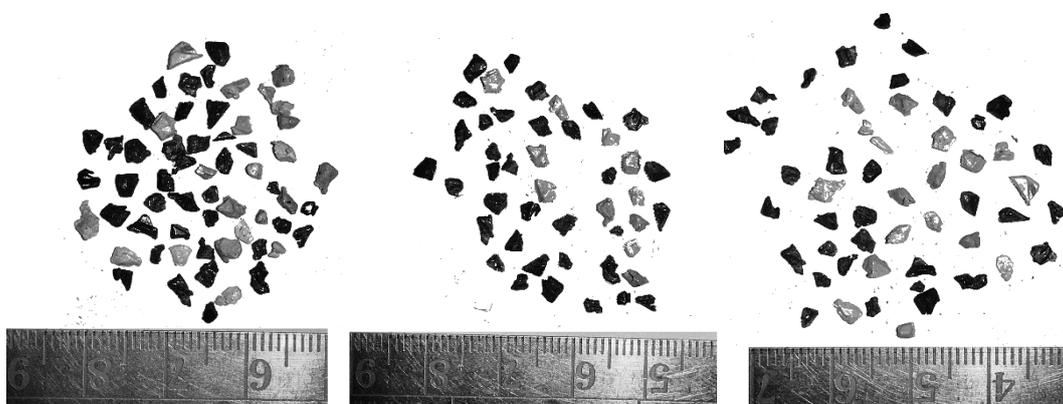


Figura 3. 5: Imágenes binarizadas tomadas con cámara digital y microscopio.

<sup>7</sup> Cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas.

Las imágenes procesadas con el software indicado, se analizaron respecto a los parámetros siguientes:

- Área de la partícula: corresponde al diámetro de la esfera que tiene la misma área de superficie que la partícula dada.
- Relación de aspecto (RA): proporción entre el ancho y el largo de una partícula. Se calcula dividiendo el eje mayor sobre el eje menor. Un valor de RA cercano a 1, es producto de una forma más cercana a la circularidad.
- Circularidad: la “cercanía” a un círculo perfecto. La circularidad es el cuadrado de la relación del perímetro de un círculo que tiene igual área proyectada (A) que la partícula dividida el perímetro de la partícula (P).
- Redondez: Hace referencia a la agudeza de los bordes. La partícula puede presentar bordes angulosos, lo que determinará una menor redondez o bordes más redondeados o de ángulos obtusos que determinarán una mayor redondez.

Otro factor determinado fue la densidad aparente. La densidad aparente corresponde a la masa del conjunto dividida el volumen total que ocupa con vacíos incluidos, introduciendo las mismas en un recipiente y luego pesando el conjunto, luego se utilizó la siguiente fórmula:

$$\rho = m/v$$

Donde:

$\rho$ : densidad aparente (g/cm<sup>3</sup>)

m: peso del material incluyendo vacíos (g)

v: volumen del recipiente (cm<sup>3</sup>)

En la Tabla 3.1 se describen los resultados de forma para las partículas de RAEE.

El tamaño y los descriptores de forma fueron determinados usando imagen digital y un subsiguiente análisis con el software image J 1.49i el cual arrojó los resultados que se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3. 1: Descriptores de forma y densidad aparente de las muestras de plástico RAEE.

Muestra	Área (mm <sup>2</sup> )	RA	Circularidad	Redondez	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
FPR#3	(8 ± 4)	(1,6 ± 0,4)	(0,6 ± 0,2)	(0,5 ± 0,2)	0,54
FPR#8	(36 ± 20)	(1,9 ± 0,7)	(0,6 ± 0,2)	(0,6 ± 0,1)	0,57

Se observan diferencias significativas entre el parámetro de área y los demás. Esto quiere decir que por más que el tamaño de la partícula disminuye en la molienda, la forma sigue el mismo patrón.

La densidad aparente de la arena de río calculada en laboratorio es de 1,48 g/cm<sup>3</sup>, mientras que, para las FPR#3 y #8 se determinaron los valores de 0,54 y 0,57 g/cm<sup>3</sup> respectivamente, lo que implica, *a priori*, que la conductividad térmica de un mortero elaborado con FPR sería menor a la de un mortero elaborado con un agregado natural como la arena gruesa [181]. La determinación de estos parámetros permite establecer, las características propias del material a los fines de evaluar posibles aplicaciones.

A partir del valor del área se puede determinar la distribución de áreas de las partículas. Puede observarse que el histograma de FPR#3 (Figura 3. 6) presenta una forma irregular con mayor cantidad de partículas de tamaños entre 3 y 8 mm<sup>2</sup>. Las barras de FPR#8 (Figura 3. 7) por el contrario indican una distribución

de partículas más homogénea respecto a superficie, con mayores cantidades de partículas de entre 13 y 30 mm<sup>2</sup>.

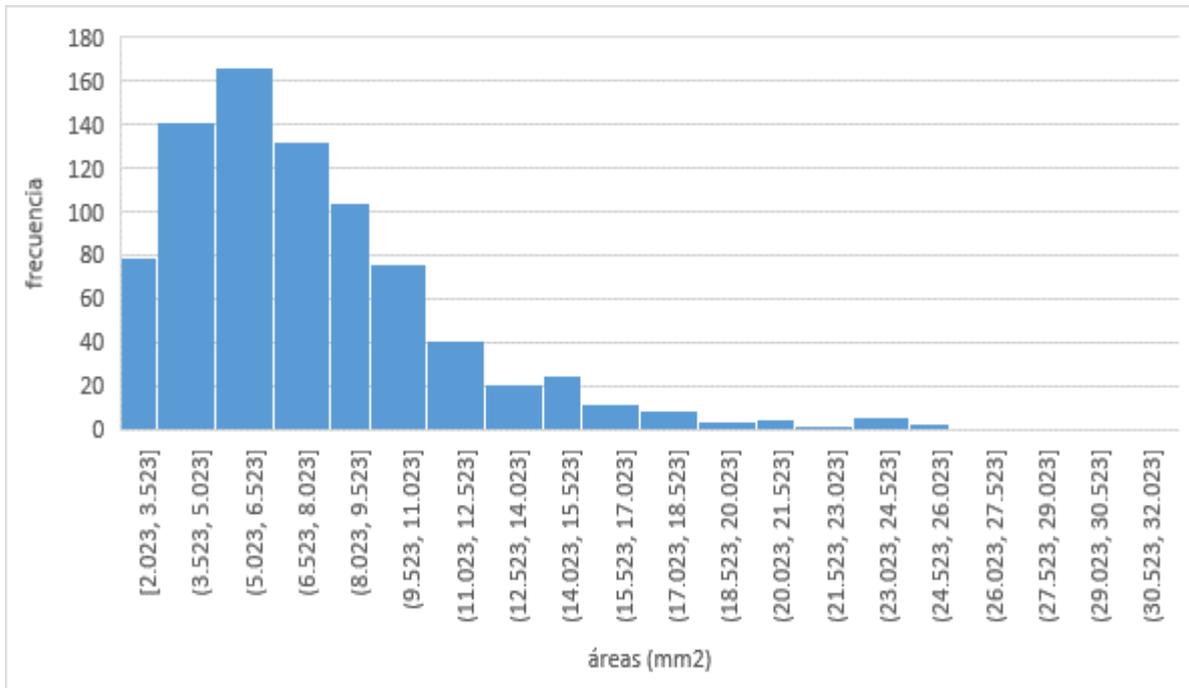


Figura 3. 6: histograma de distribución por áreas de FPR#3.

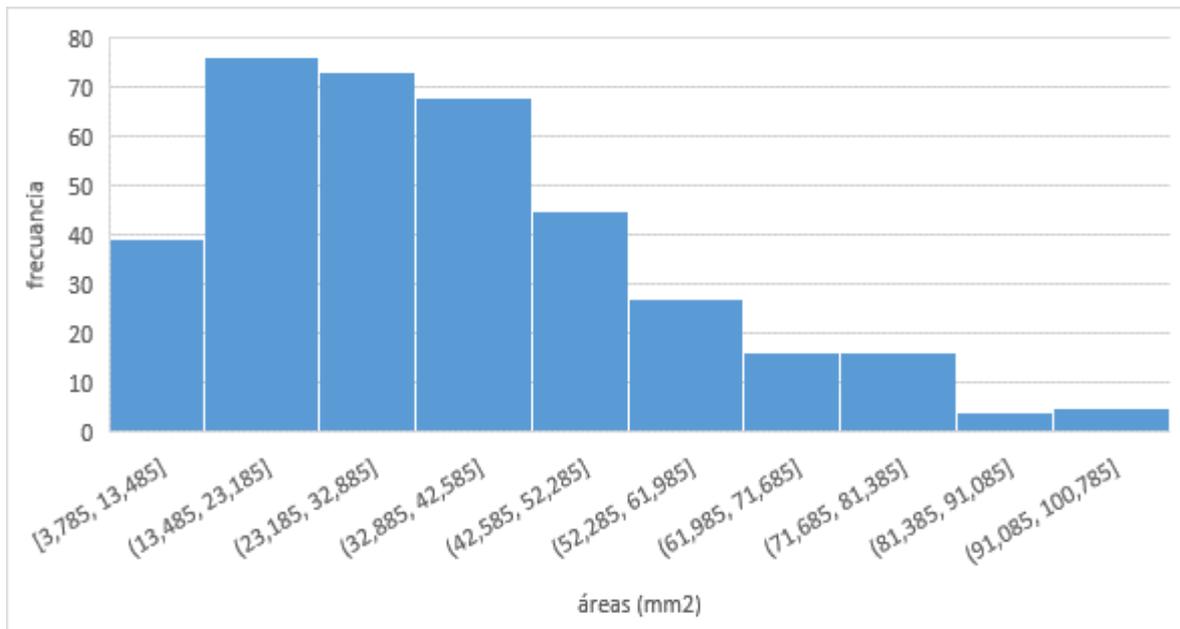


Figura 3. 7: histograma de distribución por áreas de FPR#8.

El análisis de distribución de tamaño de partículas de FPR y arena gruesa natural como patrón, se desarrolló mediante el método de análisis granulométrico acorde a la norma IRAM 1505 [182] y se utilizó una balanza de precisión de 0,001 g y tamices estándar. Los resultados se presentan en la Figura 3.9 Los módulos de finura fueron determinados bajo la norma IRAM 1505 [183]. El módulo de finura (MF) es un parámetro que se obtiene de la suma de los porcentajes retenidos acumulados de la serie de tamices especificados que cumplan con la relación 1:2, desde el tamiz # 100 (0,160 mm) en adelante hasta el tamaño máximo presente y dividido en 100, para este cálculo no se incluyen los tamices de 1 "y ½" (25 y 12,5 mm respectivamente). Se considera que el MF de una arena adecuada para producir hormigón debe estar entre 2,3 y 3,1; donde un valor menor que 2,0 indica una arena fina; 2,5 una arena de finura media; y más de 3,0 una arena gruesa y la curva granulométrica en todos los casos, debe ser continua.

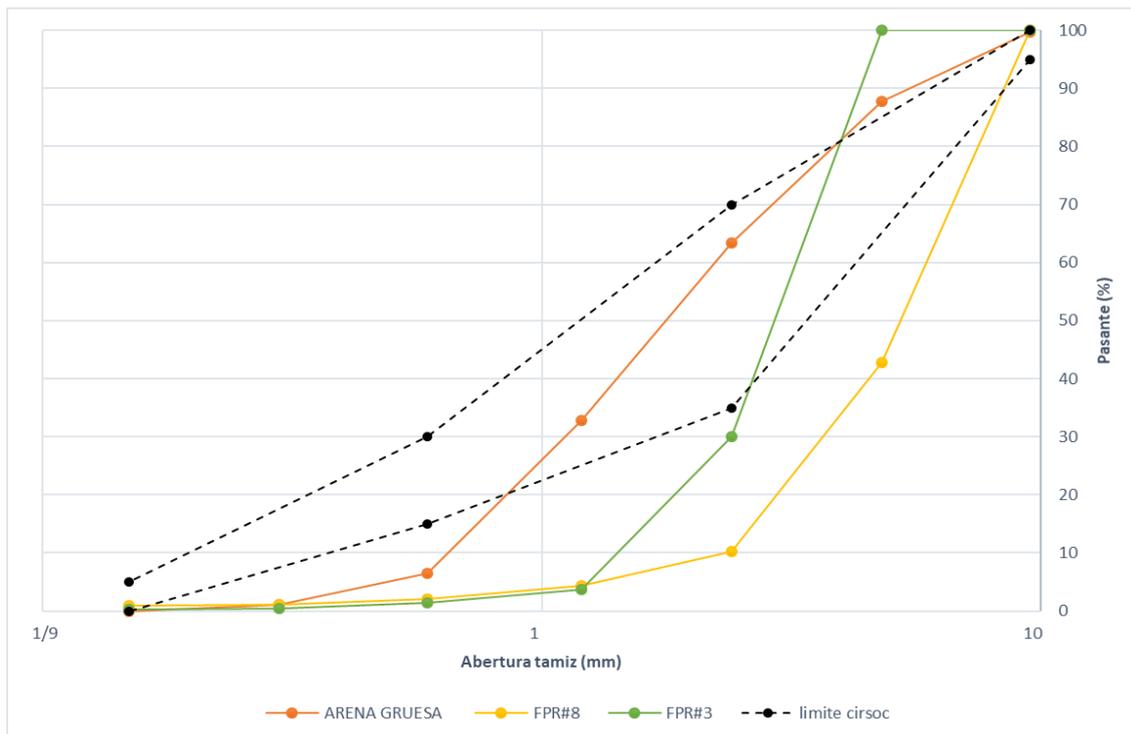


Figura 3. 8: distribución de tamaños de partícula por tamices según norma IRAM 1505 [183].

De manera general, las muestras FPR, frente a las muestras de agregado fino natural presentan curvas discontinuas. Esto es debido a su forma de obtención mediante el triturado con molino. Los valores de módulo de finura resultaron mayores a los del agregado fino natural (Tabla 3.2), esto se debe a que el tamaño de las partículas es mayor en todos los casos. Se observa que las muestras que más se asemejan a la curva límite indicada por el Reglamento CIRSOC 201 [184] y norma IRAM 1627 [185] y con la cual el agregado fino natural coincide en mayor medida es FPR#3, las cuales presentan también los valores más cercanos del módulo de finura de dicho agregado.

Tabla 3. 2: módulos de finura de los agregados.

Muestra	MF
FPR#3	4,70
FPR#8	5,47
Arena gruesa	3,09

### 3.2.2. Caracterización química (Composición polimérica)

Se llevó a cabo el análisis químico del residuo mediante la técnica de Espectroscopia Infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR) utilizando un espectrómetro de reflexión total atenuada Thermo Scientific Nicolet iN10 IR. Se hicieron muestras de láminas a compresión utilizando una prensa de 20 T y se sujetaron a cristal de ZnS antes de las mediciones, las cuales consistieron en 64 escaneos en el rango de 4000 a 400  $\text{cm}^{-1}$  y con una resolución de 4  $\text{cm}^{-1}$ , los datos fueron procesados usando el software espectroscópico Omnic. Subsecuentemente, la identificación de los polímeros se desarrolló mediante una comparación de los espectros de transmitancia de la muestra con bibliotecas de espectros de referencia (Figura 3. 9).

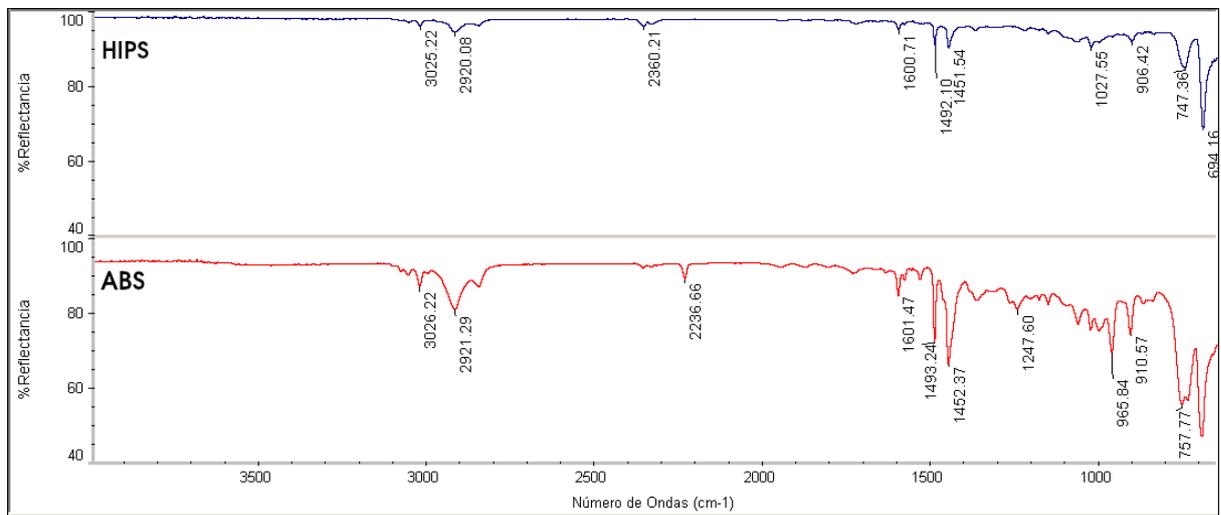


Figura 3. 9: Espectros FTIR de los polímeros que conforman la FPR, poliestireno de alto impacto (HIPS) y del acrilonitrilo butadieno estireno (ABS).

Mediante el Análisis FT-IR, se pudo comprobar la gran cantidad de polímeros de diferente composición y mezcla presentes en la muestra. La mezcla de plásticos de RAEE analizada estaba compuesta de: HIPS (34,4%), ABS (62,2%) y ABS/PC (2,2%) y en la Figura 3. 10, estos valores se ven reflejados en un gráfico de torta.

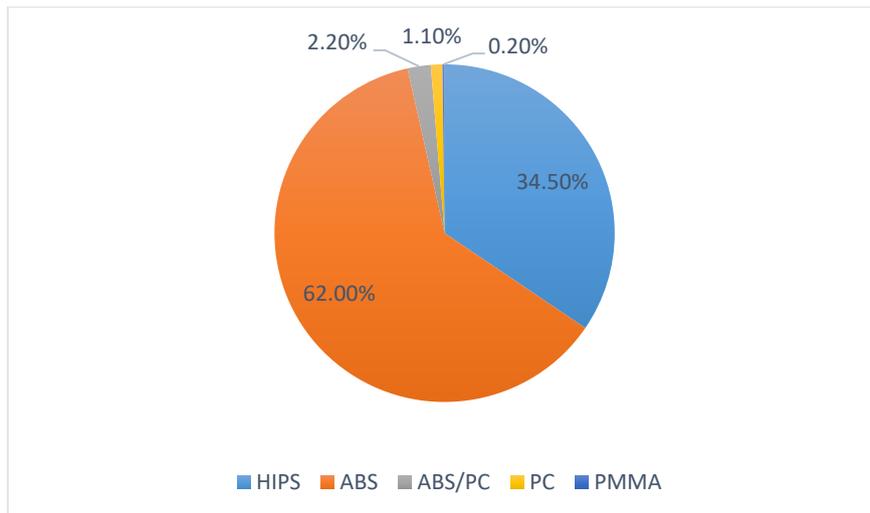


Figura 3. 10: composición polimérica de la muestra de FPR.

### 3.2.3. Análisis de contaminantes químicos

La segunda etapa de la caracterización química comprendió la búsqueda de contaminantes presentes en el residuo. Estos contaminantes fueron diferenciados en compuestos orgánicos bromados por un lado y de restos metálicos por el otro.

Criterios de practicidad fueron considerados para la elección de la muestra en estos análisis. Se eligió solo la muestra FPR#3 debido a que fue éste el tamaño de partícula que presentó factores de tamaño y forma y curva granulométrica más cercanos a los del árido natural y que, de todas maneras, de haber analizado las dos muestras (FPR#3 y FPR#8) la lixiviación sería muy similar entre ambos debido a la superficie específica de los mismo se encuentra dentro del mismo orden de magnitud. El análisis que se describe en este apartado consiste en la simulación de este fenómeno, pero en condiciones de laboratorio, sometiendo a las partículas de FPR#3 al contacto con agua destilada y agua regia a diferentes temperaturas con el objetivo de evaluar si efectivamente se desprenden restos de contaminantes mediante la comparación con patrones obtenidos en el laboratorio.

#### 3.2.3.1 Contaminantes orgánicos bromados - Tetrabromobisfenol A (TBBPA)

El TBBPA es el componente retardante de llama que se emplea en la mayoría de los aparatos Eléctricos y Electrónicos y el más vendido también, representa alrededor del 60% del mercado [52]. Por esta razón, el análisis químico que se desarrolló en esta tesis sobre las partículas de FPR, apunta a la detección en agua de este compuesto en particular.

Se usó agua Mili Q para los lixiviados y el patrón TBBPA fue obtenido mediante aislamiento por cromatografía en columna (procedimiento graficado en la Figura 3.12) en los laboratorios del CEVE, con una pureza del 99%. Se cuantificó con el método del estándar interno usando: docosano  $\geq 99\%$  ( $C_{22}H_{24}$ ) y 9-bromoantraceno  $\geq 99\%$  ( $C_{10}H_{15}Br$ ) ambos de Fluka.

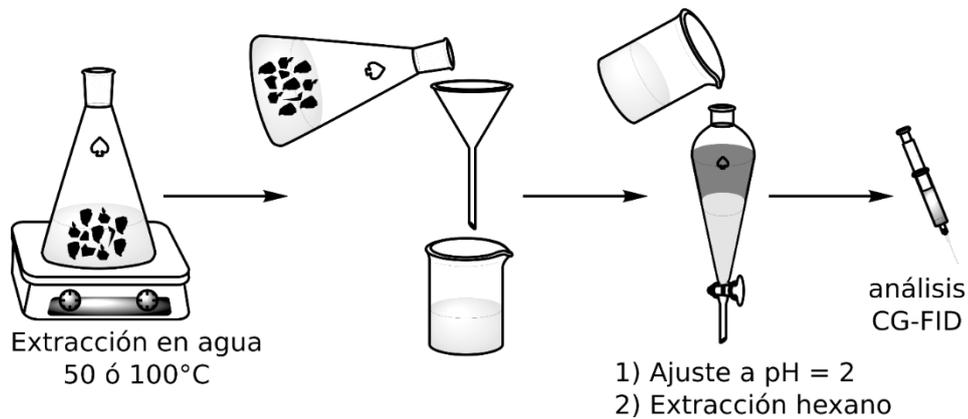


Figura 3. 11: extracción de TBBPA en extracción con hexano.

Las concentraciones de compuesto orgánico para cada lixiviación fueron medidas por análisis GC-FID en partículas de FPR. Las cantidades de derivados de estireno indicadas en esta Tabla se refieren a la concentración para la extracción de FPR. La identidad de los compuestos orgánicos se asignó mediante la técnica GC-MS.

- Análisis cuantitativo de compuestos orgánicos con cromatografía de gases

Para llevar a cabo la cuantificación de TBBPA en los diferentes lixiviados, tanto para las extracciones a diferentes temperaturas como para las aguas de curado, se utilizó cromatografía de gases. Para ello, se empleó un cromatógrafo con detector de ionización de llama (FID), marca Shimadzu modelo GC-2010. Se utilizó una columna capilar VF-5 ms, 30 m x 0.25 mm x 0.25  $\mu\text{m}$  y utilizando  $\text{N}_2$  (nitrógeno) como gas portador. La cuantificación de TBBPA se realizó utilizando el método de calibración con estándar interno ( $r^2 > 0,99$ ) con muestras auténticas. El límite de detección se calculó utilizando la desviación estándar de los residuales de la curva de calibración. Se utilizaron dos estándares internos, por lo que el LOD informado fue un promedio de estas dos calibraciones. El límite de cuantificación se calculó utilizando la desviación estándar de los residuales de la curva de calibración (Ver Figura A. 2)

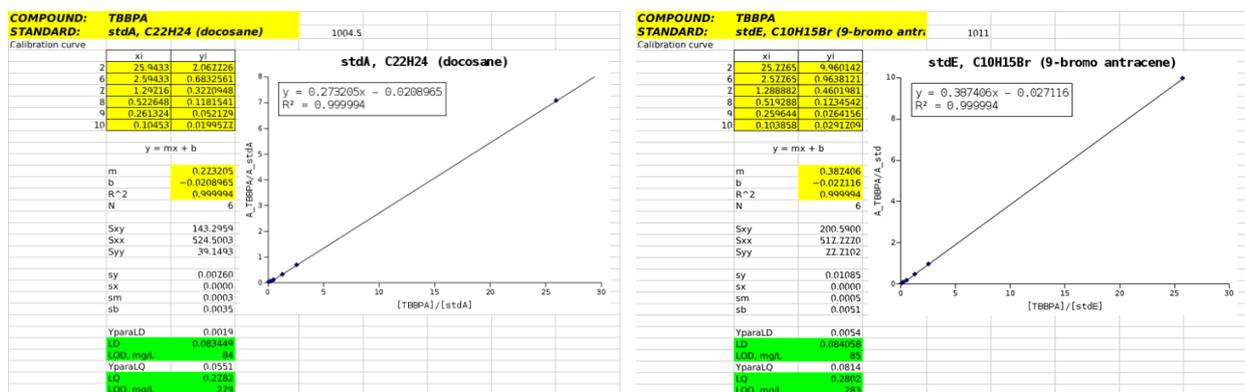


Figura 3. 12: Curvas de calibración para la cuantificación del TBBPA. Se utilizaron dos estándares diferentes, docosano y 9-bromo antraceno. Se presentan los cálculos para la obtención de los LOD y LOQ.

La Tabla 3.3 muestra las concentraciones obtenidas para TBBPA y derivados de estireno. Los valores informados corresponden al promedio de 5 determinaciones con el correspondiente desvío estándar.

Tabla 3. 3: concentraciones de TBBPA en lixiviados en muestras de FPR.

Entrada	Muestra	Condición	[TBBPA] <sup>1</sup>	TBBPA <sup>2</sup>	Derivados de estireno <sup>3</sup>
1	FPR#3	TCLP <sup>4</sup>	<LOD <sup>5</sup>	<LOD	-
2	FPR#3	FPR100 <sup>6</sup>	(23,0 ± 0,1)	(23,0 ± 0,1)	1
3	FPR#3	FPR50 <sup>7</sup>	(4,4 ± 0,1)	(4,4 ± 0,1)	1

<sup>1</sup> Concentración de TBBPA (x10<sup>2</sup> mg / L) en la solución concentrada, volumen total de 10 mL.

<sup>2</sup> Lixiviado de TBBPA de muestras en mg<sub>TBBPA</sub> / kg<sub>FPR</sub> (X10<sup>1</sup> mg / kg).

<sup>3</sup> Concentración relativa a las entradas 2 y 3 de FPR.

<sup>4</sup> TCLP: Extracción de muestra que contiene 100 g de FPR, mediante procedimiento de lixiviación característica de toxicidad (TCLP). Se utilizó el fluido n. ° 1 (4,5 ml de ácido acético glacial + 100 ml de agua milli-Q) como disolvente. Extracción realizada a temperatura = 25 °C. La agitación se realizó tres veces. [186].

<sup>5</sup> Límite de detección (LOD = 84 mg / L) y límite de cuantificación (LOQ = 281 mg / L).

<sup>6</sup> 100°: Extracción de muestra conteniendo 100 g de FPR, utilizando 300 mL de agua mili-Q como solvente a temperatura = 100 °C por 1 h, sin agitación se realizó tres veces.

<sup>7</sup> 50°: Extracción de muestra conteniendo 100 g de FPR, utilizando 300 mL de agua mili-Q como solvente a temperatura = 50 °C durante 1 h, sin agitación, tres veces.

En general, los compuestos de BFR son derivados de difeniléteres. Sin embargo, TBBPA es un compuesto fenólico. Por lo tanto, se espera que este retardante de llama tenga un comportamiento ácido-base, diferente al de otros BFR. Esto significa que en medios ácidos y neutros (pH < 7) los grupos oxidrilos del TBBPA se encuentran protonados y por lo tanto la molécula es globalmente neutra y posee una baja solubilidad en agua; mientras que en medios alcalinos (pH > 7) los grupos oxidrilos del TBBPA se encuentran desprotonados y por lo tanto la molécula es globalmente un ion negativo y posee una alta solubilidad en agua. La entrada 1, en la Tabla 3. 3, muestra la extracción de los contaminantes orgánicos empleando el método TCLP. El método cuyas siglas en inglés corresponden a “*Toxicity characteristic leaching procedure*” [187], consiste en una extracción en condiciones suaves, en un medio ácido (pH 5) y a temperatura ambiente (25 °C). El lixiviado obtenido con este método mostró una concentración muy baja de TBBPA, como así también de los otros compuestos orgánicos (por debajo del límite de detección) en la FPR. Esto pone en evidencia que una extracción acuosa en condiciones suaves no es suficiente para extraer el TBBPA de la matriz polimérica.

En condiciones de lixiviado más drásticas con agua mili-Q a 100 °C y 50 °C (entradas 2 y 3) se observó un mayor grado de extracción. Cuando la extracción se realizó a 100°C, lixiviaron 230 mg de TBBPA por kg de FPR, mientras que sólo 44 mg de TBBPA por kg de FPR lixiviaron cuando la temperatura de la extracción fue de 50°C.

En la Figura 3. 13 puede observarse el cromatograma de los lixiviados en agua de la FPR, en donde se evidencia la presencia del TBBPA con un pico significativo.

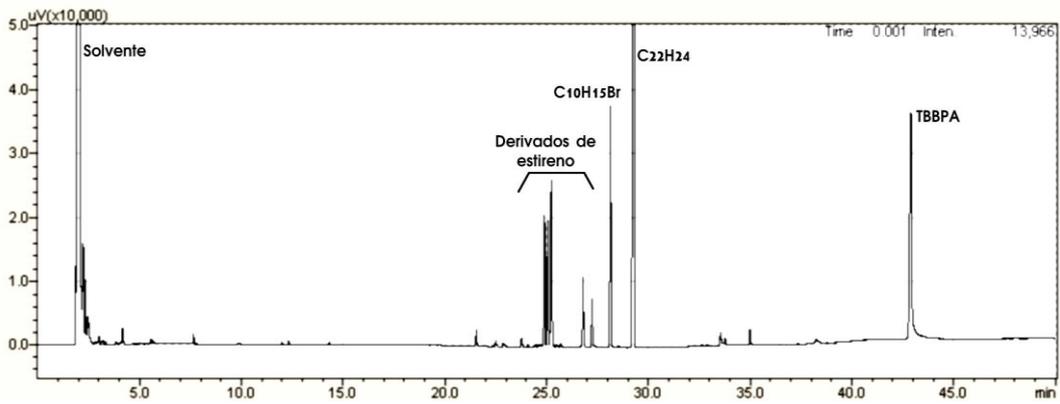


Figura 3. 13: Cromatograma representativo de los lixiviados en agua de la FPR. El cromatograma presentado en esta figura corresponde al lixiviado de FPR#3 en agua a 100°C (FPR100, entrada 2 de la Tabla 3.3).

En la Figura 3. 14, vemos la señal de TBBPA y cómo se va magnificando, conforme aumenta la temperatura del ensayo.

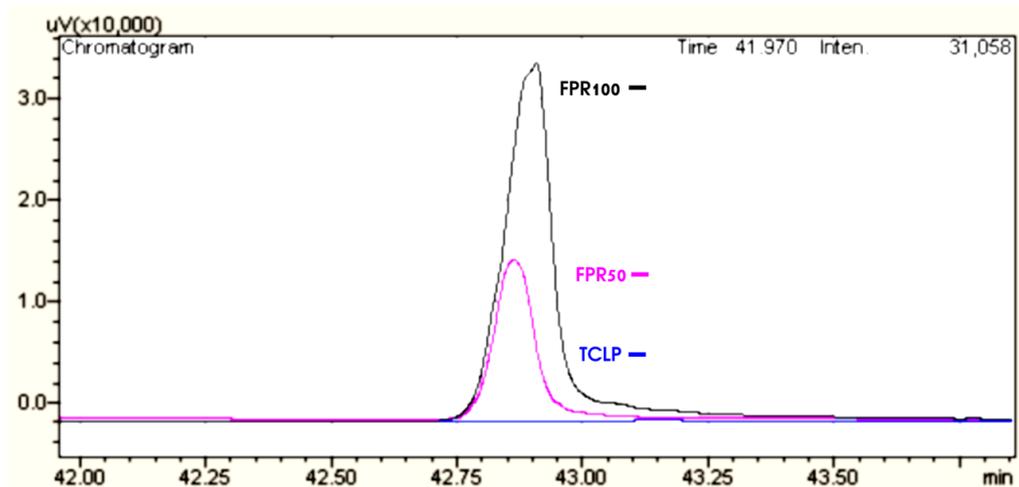


Figura 3. 14: Señal correspondiente al retardante de llama bromado TBBPA, lixiviado en agua a partir de FPR#3. Comparativa de lixiviado de TBBPA en diferentes condiciones: 100°C en agua, FPR100 (negro); 50°C en agua, FPR50 (rosa); 25°C en solución de ácido acético.

### 3.2.3.2. Contaminantes metálicos

Se determinó el contenido de algunos metales pesados en la muestra de FPR#3. Más allá que, como se expresó en el Capítulo 2, los metales comúnmente encontrados en la FPR son hierro, aluminio, calcio, magnesio, níquel, cobre, plomo, zinc, cromo, cadmio, antimonio y titanio, los metales aquí cuantificados se limitaron a cobre, plomo, zinc, cromo, magnesio, antimonio, y cadmio por ser estos los que se consideran de mayor peligrosidad y se sabe que están presentes en el residuo. Magnesio y cadmio no fueron detectados por esta técnica. Cobre y cromo no pudieron ser cuantificados por extracción en agua regia debido a la presencia de residuos metálicos provenientes de los procesos de trituración del plástico, lo que produciría una alta variabilidad en los resultados de cuantificación de estos metales.

El primer ensayo que se desarrolla en la tabla es una digestión ácida. La misma se realizó con agua regia preparada mezclando ácido clorhídrico y ácido nítrico de grado analítico en una proporción de 3:1 a una temperatura de 80°C. Se filtró el sólido y la fracción acuosa se analizó mediante espectroscopia de

absorción atómica. Mediante esta metodología se logra obtener la mayor solubilidad de los metales y de esta manera se obtiene el valor de referencia máximo de lixiviado.

La lixiviación de metales fue analizada bajo dos métodos; uno de ellos con condiciones drásticas; consiste en una extracción con agua destilada a una temperatura de 100 °C. Se sumergen las partículas en el agua y se mantiene la condición por una hora sin agitación y se repite 2 veces más. Se filtró el sólido y la fracción acuosa se analizó mediante espectroscopia de absorción atómica.

El otro método, de condiciones leves es la extracción mediante TCLP que se desarrolla de la misma forma que el anterior pero el solvente que se utiliza es ácido acético glacial y agua MiliQ a 25°C, en un transcurso de 18 h con agitación. Con estos métodos se determinaron las concentraciones de plomo (Pb), zinc (Zn), cromo (Cr), antimonio (Sb) y cobre (Cu) en las muestras de FPR. Para la cuantificación, las soluciones estándar fueron preparadas con material de referencia trazable hacia SI con una concentración nominal de 1000 mg/L. La técnica utilizada para la determinación fue la espectrometría de absorción atómica.

- Análisis de componentes metálicos por espectrometría de absorción atómica

Para determinar la concentración de metales en las diferentes fracciones acuosas, se procedió de la siguiente manera: Se utilizó un espectrómetro de absorción atómica AA Analyst 200 modelo Perkin-Elmer para mediciones de absorción atómica de llama equipado con cabezales de quemador para aire-acetileno y cabezales de quemador para operaciones de óxido nitroso-acetileno, lámparas de cátodo hueco de un solo elemento y lámparas de descarga sin electrodos. Los estándares de calibración se prepararon agregando los analitos a una solución acuosa de HNO<sub>3</sub> al 10%. Las calibraciones se basaron en curvas de trabajo lineales utilizando al menos cuatro de estas soluciones estándar.

La Tabla 3.4 muestra las concentraciones de metales y metales pesados en las muestras de FPR#3. En la entrada 1 de la Tabla 3 1, se presentan los valores de las concentraciones metálicas para la digestión ácida y en la entrada 2 y 3 los valores para la lixiviación de los metales.

Tabla 3 1: cuantificación de metales presentes en las muestras de FPR.

Entrada	Muestra	Condición <sup>6</sup>	Cu	Pb	Zn	Cr	Sb
1	FPR#3	AR <sup>1</sup>	Nd <sup>2</sup>	(51,8 ± 0,4)	(155 ± 4)	nd	(741 ± 10)
2	FPR#3	FPR100 <sup>3</sup>	(0,195 ± 0,003)	< LOQ	(0,176 ± 0,002)	< LOQ	(23,6 ± 0,5)
3	FPR#3	TCLP <sup>4</sup>	< LOQ <sup>5</sup>	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ

<sup>1</sup> Digestión con agua regia (HCl<sub>3(c)</sub> 3:1) a 80 °C por 8 h.

<sup>2</sup> No determinado.

<sup>3</sup> Extracción con 500 mL de agua destilada como solvente a 100 °C por 1 h sin agitación, tres veces.

<sup>4</sup> Extracción mediante procedimiento de lixiviado tóxico característico (TCLP). Fluido usado como solvente preparado con 4,5 mL de ácido acético glacial + 100 mL de agua MilliQ. La extracción fue llevada a cabo a 25 °C por 18 h con agitación.

<sup>5</sup> Por debajo del límite de cuantificación (LOQ; [Cu] = 0,061 mg/kg, [Pb] = 0,79 mg/kg, [Zn] = 0,038 mg/kg, [Cr] = 0,021 mg/kg, [Sb] = 4,5 mg/kg)

<sup>6</sup> Los valores informados corresponden a un promedio de tres determinaciones con desviación estándar. La concentración de metales lixiviados corresponde a mg<sub>metal</sub>/kg<sub>FPR</sub>

Puede verse en la Tabla 3 1, la información sobre el lixiviado de los metales medidos. En la entrada 1 se muestra la cantidad de metal que se extrajo mediante digestión con agua regia, la cual correspondió a la concentración total de metal en la muestra de FPR#3. Vemos cómo el Antimonio (Sb) constituye una importante cantidad de material lixiviado (741 mg/kg), lo cual se corresponde con los resultados obtenidos por Dimitrakakis y col. [9] y con el hecho de que el óxido de antimonio es un aditivo agregado

a los plásticos de AEE para lograr un mayor desempeño de retardo del fuego de los BFRS<sup>8</sup> [3], [9]. La determinación de Zn por la digestión en agua regia mostró un valor de 155 mg/kg. Cuando se realizó el ensayo de extracción por lixiviación en condiciones drásticas (Entrada 2), la cantidad de metales lixiviados resultó menor. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el único metal pesado peligroso lixiviado con una concentración significativa fue el Sb (23,6 mg/kg). Los lixiviados bajo condiciones suaves (Entrada 3) presentaron valores por debajo de los límites de cuantificación correspondientes a cada metal. Se concluye entonces, luego de haber realizado la revisión bibliográfica y haber desarrollado las comparaciones fácticas para obtener resultados precisos correspondientes a la propia muestra, que la FPR presenta una composición heterogénea, principalmente compuestas por ABS, HIPS y ABS/PC. Que esencialmente estos plásticos presentan cantidades considerables de TBBPA y Sb, lo que significa que en el principal retardante de llama encontrado fue el TBBPA. Las muestras de plásticos mezclados requieren minuciosos, complejos y costosos procesos de separación química o manual. De re-usarse en conjunto no pueden fundirse debido a los diferentes puntos de fusión que cada plástico presenta y a las impredecibles propiedades mecánicas que de cada mezcla podrían surgir. Por otro lado, los metales pesados y los BFR generan daños en la salud de las personas (cáncer, disfunciones endocrinas, entre otros problemas.) y en el ambiente (acumulación, biomagnificación) por lo que de reciclarse la FPR deberían ser separados y eliminados o neutralizados. En este trabajo de tesis doctoral se presenta el procedimiento propuesto que contempla la heterogeneidad del material y la neutralización de metales pesados y BFR mediante estrategias que involucran el uso de una matriz cementicia y aditivos.

### 3.3 Conclusiones del capítulo

Se comprueba entonces lo establecido por otros autores. El mayor porcentaje de HIPS y ABS obtenido por FT-IR por Maris y col. [6] y por Schlummer y col. [30] coincide con los resultados de FTIR obtenidos en este trabajo. La muestra exhibió la presencia ABS en un 62% y HIPS en un 34%. El 3,5% restante fue ocupado por mezclas de ABS/PC en mayor medida y PC y PMMA en cantidades menores.

La FPR analizada consiste entonces en una mezcla heterogénea de plásticos triturados que provienen de carcasas de aparatos electrónicos diversos. Así mismo, tal y como fue demostrado por Maris y col, y Peeters y col. [188] la separación por inmersión de estos polímeros no resulta eficiente ya que ambos presentan densidades muy similares. Es oportuno destacar que resulta muy dificultoso para los recicladores, realizar una clasificación previa a la molienda por tipo de AEE procesado, lo que permitiría un mayor grado de homogeneidad en el residuo, pero una estratificación como materia prima difícil de sostener en el tiempo y con las cantidades que demanda un proceso productivo de gran escala que utiliza este residuo. Lo que sucede en la práctica es que se lleva a cabo la molienda de toda la fracción plástica en su conjunto, sin mayores discriminaciones por el tipo de procedencia. Si bien, en general, se obtuvo un buen grado de homogeneidad en las muestras procesadas, se pudieron identificar algunos lotes con un cambio muy marcado en el material de molienda, que debe ser evitado. Si bien la tecnología desarrollada en la presente tesis es robusta y permite cierto grado de variabilidad en la composición entre los lotes que se incorporan al proceso, es necesario mantener cierto criterio en la composición del residuo y no hacer grandes modificaciones en el material procesado.

---

<sup>8</sup> En estudios previos, el equipo de investigación determinó la relación Sb/Br mediante Microscopía electrónica de barrido y Espectroscopia de energía dispersiva (SEM-EDS), obteniendo un valor promedio de (0,35 ± 0,04) (promedio de 10 muestras).

En relación a la granulometría se pudo verificar una mayor homogeneidad de tamaños en FPR#8 en relación a las áreas de las partículas, sin embargo, en la curva granulométrica, la muestra que más se asemejó al agregado grueso natural tanto en su curva como en su MF fue FPR#3.

Respecto factores de tamaño y forma como relación de aspecto, redondez y circularidad, la muestra FPR#3 arrojó mejores resultados ya que sus valores son los más cercanos a los de la arena. Para densidad aparente también resulta elegible FPR#3 ya que, aunque con poca diferencia, un menor valor de densidad puede significar mayores propiedades de aislación térmica a la hora de aplicarlo en un componente.

En relación al lixiviado de TBBPA, al igual que en los trabajos de Kousaiti y col. [179] y Aldrian y col. [48], se comprobó la presencia del compuesto en la matriz polimérica. En este trabajo se pudo verificar que la extracción sucede en mayor extensión a medida que se intensifican las condiciones, lo cual pone de manifiesto que a largo plazo existe un comportamiento perjudicial de los contaminantes orgánicos que, en el agua se trasladan a la tierra y ambiente en general. Estos resultados de cantidad de lixiviado de TBBPA a partir de la FPR, serán los valores de referencia sobre los que se realizarán comparaciones en los capítulos siguientes.

El principal metal pesado encontrado fue Sb. La presencia significativa de este metal corresponde a la presencia de TBBPA y, comprueba lo establecido por otros autores de que el Sb y el TBBPA actúan de manera conjunta durante la vida útil del aparato y que, en su fin de vida ambos lixivian, lo que constituye un potencial toxico para el ambiente y la personas.

## CAPITULO 4. MATERIAL COMPUESTO CON MATRIZ CEMENTÍCEA Y AGREGADOS DE FPR

En el primer apartado se define y caracteriza al hormigón como material compuesto y las principales normas en que debe regir su aplicación. Luego en el apartado 4.2 y sub-apartados, se desarrollan las diferentes alternativas de agregados en matriz cementicia y cómo interfiere la naturaleza y características del agregado en las propiedades finales del hormigón.

#### 4.1. Material compuesto con matriz cementicia

El hormigón constituye un claro ejemplo de composite con matriz cementicia; partículas de grava o arena en una matriz de concreto u hormigón. Puede definirse al concreto como un material compuesto formado por un medio conglomerante (cemento Portland + agua) y partículas (agregados fino y grueso) [189], que se combinan para generar un material de consistencia plástica, con elevada resistencia mecánica y resistente además al ataque químico de agentes externos y al agua. Los agregados conforman entre el 65 y 75% del volumen del hormigón y sus propiedades controlan muchas de sus características [190]. El mortero también constituye un material compuesto por partículas, pero difiere del concreto en que no presenta agregado grueso.

Los agregados finos, generalmente arena, representa el 40% del total de los agregados y sus propiedades pueden afectar al hormigón tanto en estado fresco como endurecido, por lo que, de requerir un hormigón con propiedades especiales, como por ejemplo alta resistencia, se pueden controlar los parámetros de forma, textura superficial, tamaño, porosidad y mineralogía.

La forma y textura superficial de los agregados tiene una gran influencia en algunas propiedades del hormigón fresco y endurecido, como la trabajabilidad y la resistencia mecánica [191]. Las partículas con textura rugosa, angulares o alargadas requieren de mayor cantidad de agua que las lisas, redondeadas y compactas para poder producir un concreto trabajable y por lo tanto más cemento para poder mantener la relación agua-cemento, afectando finalmente la resistencia [192].

Las piedras redondeadas, o cantos rodados, son las provenientes de ríos que presentan, aparte de una forma redondeada, una textura pulida producto del rozamiento entre las mismas. Las angulosas son las piedras que generalmente han sido sometidas a una trituración y que presentan, por lo tanto, ángulos, aristas vivas y superficies más o menos planas. Pudiendo predominar dos dimensiones en las formas planas o una dimensión en las aciculares, dando lugar a una forma de aguja o fibra [193].

En el trabajo de Tesis de grado de Zerga Ardiles [194], se compararon agregados finos provenientes de diferentes canteras de acuerdo a su forma, con el objetivo de evaluar si dicho parámetro interfiere en las propiedades físico mecánicas del hormigón. Uno de ellos con forma subangular y textura rugosa y el otro con forma subredondeada y textura pulida. Se concluyó que la resistencia a la compresión, a la edad de 28 días y con una misma relación agua-cemento se incrementa en un 24-31% en los hormigones con agregados de forma subangular y textura rugosa. A la vez que con este mismo agregado se obtuvo mayor módulo de finura. También se evaluó la fluidez, una medida de consistencia del mortero que se expresa en términos del incremento del diámetro de una muestra moldeada por un medio cono, este parámetro sí tuvo relación con la relación agua-cemento. Con una relación A/C de 0,40 se obtuvo mayor fluidez para las primeras muestras y con una relación de 0,50 la fluidez se igualó en ambas muestras.

Según su tamaño, los agregados se dividen en dos grupos: los agregados finos y los agregados gruesos. Los primeros consisten en arenas naturales o trituradas con tamaños de partícula que van desde 60  $\mu\text{m}$  hasta 4,75 mm y los segundos son aquellos cuyas partículas son mayores a 4,75 mm y hasta 150 mm [195]. Los agregados gruesos en un porcentaje máximo, tienen un efecto positivo para la resistencia final de hormigón, las características del flujo plástico, la contracción por secado y la permeabilidad [196]. La granulometría y el tamaño máximo del agregado afectan las proporciones de los agregados gruesos, los requisitos de agua y cemento, la trabajabilidad, la economía y la durabilidad del concreto. Cuando los agregados son muy gruesos, pueden producir mezclas rígidas, cuando los agregados presentan tamaños más homogéneos, tienen una curva granulométrica suave, por lo que producirán resultados más satisfactorios en las propiedades del concreto fresco [197].

Para los agregados finos, hay dos factores que intervienen de manera considerable, el módulo de finura (MF), y la continuidad en los tamaños, ya que algunas arenas pueden tener módulos de finuras aceptables (entre 2,2 y 3,1) pero una granulometría discontinua, es decir que no abarca todos los tamaños, es poco uniforme o poco graduada. Con un MF mayor a 3,1 (arena gruesa), pueden obtenerse mezclas poco trabajables, debido a la falta de cohesión entre sus componentes lo que produce mayores requerimientos de cemento. Cuando el módulo de finura es menor a 2,2 (arena fina), puede ocurrir que los concretos sean pastosos, que requieran más cemento y agua para una resistencia determinada y una mayor probabilidad de que ocurran agrietamientos de tipo contracción por secado [198].

Para los agregados gruesos, la forma se determina mediante el coeficiente de forma. El coeficiente de forma es la relación entre el volumen efectivo de una cantidad de agregado considerado y el volumen de las esferas circunscritas a dichos granos. Cuando el coeficiente de forma se acerca a la unidad, los agregados presentan una forma más esférica. En este sentido, Acosta y col. [199], concluyen que, cuanto menor es el coeficiente de forma, el hormigón presenta mejor consistencia, al mismo tiempo, con coeficientes de forma similares, las texturas lisas generan un concreto con mayor consistencia. Respecto a la resistencia a la compresión y la flexo-tracción, los mejores valores se dan entre 0,20 y 0,30 pero lo que interfiere nuevamente en estas capacidades es la textura superficial.

Para obtener hormigones muy resistentes, Aranda Silva [200], en su trabajo de tesis concluyó que es posible obtener mezclas más eficientes usando agregados con tamaños máximos de 3/4", debido a que los agregados de menor tamaño producen hormigones de alta resistencia debido a la mayor cantidad de cemento por metro cúbico.

A su vez, Porrero y col. [201] determinaron que mezclas con partículas de mayor tamaño, generan mayor absorción de agua y, cuando la partícula es alargada y plana, la porosidad se incrementa y, la mayor porosidad de los agregados, por su parte facilita la adherencia entre las fases matriz- agregados pero genera al mismo tiempo, un mayor desgaste [202].

Aspectos físicos como la densidad, porosidad, peso específico de los agregados interfieren en las propiedades de transporte finales del hormigón como absorción de agua y succión capilar, entre otros. El peso específico o gravedad específica, determina el peso del agregado por unidad de volumen sin considerar sus vacíos. Mediante el cálculo de este parámetro, también puede determinarse el porcentaje de absorción o contenido de agua exacto que requiere el agregado para saturar todos sus vacíos [203]. De acuerdo a su peso específico, los agregados se dividen en liviano, normal y pesado. Según CIRSOC 201 [184] un hormigón se considera liviano cuando su densidad no excede los 2000 kg/m<sup>3</sup>, normal cuando el parámetro se encuentra entre 2200 y 2400 kg/m<sup>3</sup> y pesado cuando se superan los 2400 hasta 6000 kg/m<sup>3</sup>. Según estos parámetros, el concreto resultante se aplicará a necesidades específicas [204] y, por ejemplo, para lograr un hormigón de mayor peso específico, pueden combinarse los porcentajes de agregado grueso y fino dentro de la mezcla global de agregado de manera que se logre la densidad máxima, con mínimo volumen de vacíos [203]. Es claro que mientras más denso sea el agregado tendrá menos vacíos en su interior, haciéndolo más compacto, macizo y resistente, lo que luego se ve reflejado en el ensayo de absorción de agua [205].

En síntesis, cuando el tamaño de los agregados finos o gruesos, presenta una curva discontinua, módulos de finura demasiados bajos o bien, demasiado altos, no presentan una cierta textura que favorezca al "agarre" del cemento, no presentan una redondez, circularidad y relación de aspecto cercanas a la unidad se produce falta de cohesión entre las fases matriz agregado, lo que incrementa la porosidad, disminuye la densidad y por ende, la mezcla absorbe mayor cantidad de agua durante el fraguado, requiere mayor cantidad de cemento, generando finalmente mampuestos poco resistentes y durables por tendencia a agrietarse y mayor capacidad de retener agua por capilaridad.

Respecto a la composición mineralógica de los agregados naturales, es este un parámetro que influye en las propiedades físicas y químicas, tanto por los componentes del agregado como por las reacciones que se puedan presentar cuando el mismo entra en contacto con el cemento, como puede ser la reacción álcali-agregado [206]. Componentes como cuarzo, litio, vidrio volcánico, feldespato y liberación de sílice, pueden interferir en la reactividad alcalina potencial frente a los álcalis contenidos en el hormigón. En el trabajo de Marfil y Maiza [207] en la provincia de Bahía Blanca, los autores determinaron que las muestras que aportan mayor cantidad de sílice al medio son reactivas y que este aporte se da fundamentalmente por la presencia de vidrio volcánico en la arena es decir que podrían sufrir un mayor deterioro por ataque ácido que otras muestras como, por ejemplo, las elaboradas con feldespato, donde sucede lo inverso.

Luego, Marfil y col. [208], encontraron en la provincia de Rio Negro, materiales potencialmente reactivos desde el punto de vista petrográfico que produjeron expansiones mayores a las por IRAM 1674 [209] y CIRSOC 201 [184]. El incremento se adjudicó principalmente a las rocas volcánicas con pastas vítreas y la sílice criptocristalina que cubre gran parte de los cantos rodados.

También, Maiza y Marfil [210] estudiaron la factibilidad de las rocas volcánicas de composición riolítica como agregados para hormigón. Encontraron que las mismas, debido a la presencia de vidrio fresco, minerales lábiles y/o alteración, pueden desarrollar reacciones deletéreas<sup>9</sup> cuando se usan en un alto porcentaje como agregado en concreto.

La contaminación con materia orgánica, en los agregados ya sea por causas naturales o inadecuada limpieza durante en transporte, puede afectar negativamente las propiedades finales del hormigón. La presencia de materia orgánica en los agregados, en contenidos mayores a 500 ppm puede impedir la adecuada hidratación del cemento y, por lo tanto, retardar el fraguado de las mezclas, lo que se traduce en una reducción en la resistencia a la compresión en todas las edades [206].

A mediados del año 2021, ocurrió una tragedia en donde un edificio estadounidense de 12 plantas se desplomó de manera “sorpresiva” cobrándose la vida de 98 personas. Hoy, luego de ocurrido el hecho surgen infinidad de posibles motivos que podrían haberse tenido en cuenta para evitar la tragedia. Una de las hipótesis apunta a la naturaleza del agregado fino utilizado en la estructura. En una nota periodística en la web [211], un arquitecto argentino radicado en EE. UU aportó la teoría de que en el mencionado edificio se usó arena de playa como agregado fino, al igual que en otros edificios de la zona, motivo por el cual se produjo la corrosión acelerada de la armadura de hierro.

*“Esto se veía venir”, “Eso corroe todos los hierros y desaparecen. Pasa mucho en edificios cercanos a la playa (...) Antiguamente en los años 60 y 70 veían arena en la playa y la usaban para construir. Esa arena tiene mucha sal; el hormigón se queda sin hierros, es como si no tuviera huesos”*

Explicó el profesional, que la sal presente en la arena corroe los hierros estructurales, haciéndolos desaparecer. Más allá que esta hipótesis sea confirmada o no, y para esto se requieren exhaustivos análisis y tiempos considerables, el caso se torna de gran relevancia y constituye un claro ejemplo de cómo, el origen del agregado interfiere en las propiedades finales de resistencia y durabilidad del hormigón.

---

<sup>9</sup> Sustancias que reaccionan con el cemento, generando agresiones internas y perjudicando finalmente algunas propiedades del hormigón.

#### 4.1.1. Reglamento y normas que intervienen en el uso de agregados para hormigón

En el siguiente apartado se detallan las normas que deben respetarse para introducir mampuestos o agregados (naturales o de origen artificial) en construcciones civiles. En todos los trabajos mencionados se busca generar componentes, agregados o materiales compuestos que superen o al menos mantengan las propiedades mecánicas, físicas y de durabilidad que este tipo de componentes requieren para su correcto funcionamiento y aplicación en construcciones civiles. En todos los casos se ha alcanzado a generar los llamados componentes “*no portantes*”. Este término responde a las normas actuales para construcción que se aplican en cada país o región de donde proviene cada estudio. En nuestro país rigen, para construcciones civiles, en el caso del hormigón, los reglamentos CIRSOC [212].

Los reglamentos CIRSOC determinan niveles máximos o mínimos de, por ejemplo, resistencia a la compresión, tracción, flexión, determinan parámetros de durabilidad cuyos valores es necesario respetar para poder configurar edificaciones resistentes y seguras para las personas que tomarán contacto con la misma durante el uso.

El reglamento presenta normas tanto para mampuestos constructivos, como ladrillos, placas, vigas, etc., como para agregados para morteros, según el componente, rige la norma que le corresponde. Para agregados de morteros por ejemplo rigen el tamaño del agregado, el módulo de finura, la naturaleza del material, etc. Para mampuestos como ladrillos, rigen resistencia a la compresión, tracción, etc.

Para poder evaluar si el mampuesto producido es apto y cumple con lo solicitado por el reglamento CIRSOC en nuestro país, los ensayos deben realizarse bajo el sistema de Normas IRAM.

Las normas IRAM (Instituto Argentino de Normalización y Certificación) presentan los métodos a seguir para poder evaluar si el mampuesto, componente o agregado se encuentra apto para aplicarse en edificaciones, es decir, responde a los valores que determina el reglamento CIRSOC. Algunas de las normas que deben aplicarse para evaluar mampuestos y los correspondientes valores que exige el reglamento son las siguientes.

Respecto a los agregados, la norma IRAM 1569 [213], establece que el agregado es un material granular resultante de la desintegración natural, del desgaste de rocas o de su trituración. De escoria siderúrgica o bien, de otros materiales con tamaños de partícula estables. Por su parte, el reglamento CIRSOC 201 [184], los define como componentes del hormigón constituidos por partículas minerales y naturales, procedentes de la desintegración natural o trituración de rocas, con una forma, tamaño y distribución establecidos.

Respecto al tamaño, la norma IRAM 1627 [185], clasifica los agregados en grueso y fino. El agregado grueso es el material cuyos granos quedan retenidos en el tamiz de abertura de malla de 4,75 mm. Mientras que el agregado fino es el material que pasa por este tamiz. Por su parte el reglamento CIRSOC 201 [184], define al agregado fino a aquel que pasa en su totalidad por el tamiz IRAM 9,5 mm, casi en su totalidad por el 4,75 mm y queda retenido predominantemente en el tamiz 75  $\mu\text{m}$ . El agregado grueso por su parte según el reglamento debe cumplir con un tamaño máximo nominal de 25 mm. Y debe estar constituido por gravas (canto rodado) naturales o partidas, roca partida o mezcla de estos materiales.

Los tamices que se mencionan, deben responder a la norma IRAM 1501: *Tamices de ensayo. Tela de tejido metálico, chapa metálica perforada y lámina electroformada. Tamaños nominales de abertura* [214]. En base a estos tamices debe determinarse la granulometría del agregado la cual debe ser continua para luego obtener el Módulo de Finura (MF). El MF debe calcularse bajo los lineamientos de la norma IRAM 1505 [183], acorde a esto, el reglamento CIRSOC determina que el MF en agregados finos debe ser igual o mayor que 2,3 o menor que 3,1.

Otro aspecto a tener en cuenta a la hora de evaluar un material es la densidad, parámetro que determina la resistencia final del compuesto del que formara parte, el peso, las propiedades aislantes, etc. Respecto a esto, la norma IRAM 1520: *Agregados finos. Métodos de laboratorio para la determinación de la densidad relativa real, de la densidad relativa aparente y de la absorción de agua* [215]. Define el método a seguir para determinar la densidad aparente.

Respecto a determinación de propiedades mecánicas del cemento portland, la norma IRAM 1622: *Cemento Portland. Determinación de resistencias mecánicas* [15] que describe el método para la determinación de las resistencias mecánicas a la compresión y a la flexión de morteros de cemento. A su vez, el reglamento CIRSOC 101 [216] determina que los ladrillos cerámicos macizos deberán cumplir con la norma IRAM 12566-1: *Ladrillos cerámicos y bloques cerámicos para la construcción de muros – Parte 1: Macizos* [217] a excepción en lo relativo al valor de la resistencia característica mínima de compresión que no podrá ser inferior a 5 MPa. Los mampuestos que obtengan un valor de resistencia menor al mencionado podrán sólo ser aplicados en la obra como material de cerramiento en condición de “no portante”.

Otro aspecto importante es el agua para el lavado, mezclado y curado del hormigón. El mismo deberá cumplir con los requisitos establecidos en la norma IRAM 1601: *Agua para morteros y hormigones de cemento* [218].

#### 4.1.2. Los agregados de plásticos reciclados en el hormigón

Otra alternativa frente a las problemáticas ambientales producto del consumo de combustibles fósiles, recursos naturales y emisiones de gases de efecto invernadero, es la de aplicar residuos plásticos en matrices cementicias generando un material compuesto con propiedades mecánicas en muchos casos mejoradas y además con importantes ventajas económicas y ambientales. Existen innumerables estudios sobre el agregado de residuos plásticos en morteros y materiales compuestos de matriz cementicia. Diferentes estudios se han desarrollado en la temática en la cual, residuos plásticos pueden ser incorporados tanto como agregados como en fibras de refuerzo en morteros [159]. En estos trabajos se contemplan parámetros como composición química, dosificación, granulometría de las partículas del desecho, los cuales juegan un papel importante en las propiedades físicas y mecánicas de los materiales. Siddique [159], quien junto a sus colegas desarrollaron una revisión sobre la incorporación de plástico reciclado en hormigones en base al efecto del plástico reciclado sobre la densidad aparente, el contenido de aire, la trabajabilidad, la resistencia a la compresión, la resistencia a la tracción por división, el módulo de elasticidad, la resistencia al impacto, la permeabilidad y la resistencia a la abrasión, concluyen que la densidad aparente en hormigones con incorporación de plásticos reciclados variados se reduce entre un 2,5% y un 13% en hormigones con entre 10 a 50% de plástico. Así mismo, la resistencia a la compresión se reduce oscilando entre el 34 y 67% en hormigones con los mismos porcentajes de plástico incorporado. La resistencia a la tracción disminuye también en un 17% con un 10% de incorporación de plástico, pero se logró un comportamiento más dúctil, lo que podría significar una reducción en la formación y propagación de grietas. El polipropileno en fibras tuvo un efecto adverso sobre el contenido de aire del hormigón lo que redujo la trabajabilidad, pero a la vez se mejoró la resistencia al impacto y la impermeabilidad.

En la revisión de Gu y Ozbakkaloglu [13], se estudiaron la morfología y propiedades mecánicas de hormigones con incorporación de residuos plásticos. Tanto la resistencia a la compresión, a la tracción y el módulo elástico disminuyeron con el incremento del porcentaje de reemplazo. Respecto a la morfología, también se ve afectada por el nivel de sustitución y por el tamaño y forma del agregado. La

zona de transición entre fases del hormigón con plásticos presentó puntos de anclaje deficientes en comparación con el patrón pero que se compensa con la alta rugosidad superficial que favorece a las interacciones entre fibras, mejorando el anclaje entre fases.

Por su parte, Saikia y col. [146], en su revisión sobre el mismo tema encontraron comportamientos similares y agregaron un mejor comportamiento tenaz que, junto a la baja densidad puede contribuir a desarrollar mampuestos livianos capaces de absorber energía para por ejemplo; construcciones antisísmicas. Por otra parte, los autores mencionan un posible grado de contaminación de los plásticos reciclados con metales pesados o aditivos bromados, pero no lo analizan en profundidad.

Respecto a características físicas y fenómenos de transporte, Yun Wang Choi y col. [151] evaluaron morteros con adición de PET y encontraron que, con un menor porcentaje de plástico, menor es la absorción capilar. Cuando se utilizó de un 50 a 70% de PET como agregado, se igualó la granulometría del agregado fino natural, por lo que se incrementó la porosidad interna del mortero. Los autores determinaron entonces que la succión capilar es un parámetro indirecto para evaluar la porosidad interior del mortero. Por su parte Marzouck y col. [150], determinaron mediante imágenes SEM, que superando el 50% de reemplazo de agregados naturales por plásticos de PET, la estructura interna del mortero se torna más cavernosa, lo que produce cambios en la densidad. Manteniendo un reemplazo del 50% la sortividad bajó considerablemente, concluyendo que la sortividad disminuye con el rango de sustitución. La no sortividad del PET (por sí solo) contribuye a ralentizar la propagación del frente de imbibición forzando el flujo de hidratación y evitándose, es decir aumentando la tortuosidad, ya si se aumenta este 50% se produce el efecto contrario.

Akcaozoglu y col. [152], estudiaron también el plástico de botellas de PET en matrices cementicias para obtener hormigones livianos y encontraron que la succión capilar y porosidad de un mortero que contiene 100% de reemplazo con PET es mayor que la de las mezclas con porcentajes de 50% de PET / 50% de agregado natural. Respecto al uso de Policarbonato (PC) encontraron que la porosidad comenzaba a incrementarse en porcentajes de reemplazo a partir del 3%.

Cuando se incorporan partículas plásticas en morteros de cemento, la morfología irregular de las mismas interfiere negativamente en la formación de la interfase de cohesión con el cemento por reducción de la superficie de contacto. Las partículas estudiadas en este trabajo se estarían comportando como fibras de refuerzo, lo que genera una disminución en la resistencia a la compresión debida a esta cohesión pobre entre el plástico y el cemento, pero un aumento en la resistencia a la flexión [219], módulo de elasticidad [220] y control de agrietamiento por contracción plástica [221]. El tamaño de las partículas también es definitorio; ya que dicho factor determina la adherencia entre el mortero y el agregado [222]. En trabajos que estudian comportamientos con áridos de 25 mm, lo cual representa un mayor tamaño [223], se evidencia un aumento significativo en algunos parámetros como la permeabilidad, esto debido a la alteración de la interfase producida por el aumento del tamaño del agregado [191]. Pero, aun cuando la partícula es de mayor tamaño, al incorporar el plástico directamente en la mezcla, el desempeño final de la probeta se ve beneficiado cuando la morfología es más alargada.

A nivel local y citando nuevamente los desarrollos que han sido llevados a cabo por grupos de trabajo del CEVE. Se puede mencionar los ladrillos de PET [147], cuyas características y desempeño fueron desarrollados en el Capítulo 2.

Alesmar y col. [222], desarrollaron mezclas de PET con cemento. También se agregaron en las mezclas, arena fina y gruesa, dependiendo de lo que se quisiera desarrollar, mortero u hormigón. El PET fue incorporado en las mezclas reemplazando porcentualmente a los agregados naturales. Los primeros resultados fueron los relativos al tipo de falla producida en el mampuesto luego de efectuar el ensayo de resistencia a la compresión. En general el tipo de falla más presente fue entre el mortero y el agregado

grueso. El PET que quedó en medio de estos impidió que la interfase se genere, creando grietas en el lugar. Tampoco la adherencia entre el mortero y el PET se completó en su totalidad, lo que contribuyó también a la falla. Los autores destacan que de todas maneras la presencia de PET impidió que la grieta se completara, manteniendo unidas las dos partes. Respecto a la resistencia a la compresión, la misma disminuye en cuanto se incrementa el porcentaje de reemplazo. De todas maneras, los autores concluyen que la mezcla obtenida es factible de ser usada en construcciones que no deban soportar grandes cargas. La densidad resultó menor; por este motivo, la mezcla absorbe mayor cantidad de agua debido a la disminución de agregados finos naturales lo que hace que se generen más espacios vacíos (poros) que luego son ocupados por agua.

Por su parte Banthia y col. [221] se enfocaron en estudiar la influencia de la geometría de la partícula plástica agregada al cemento partiendo de que el refuerzo de fibras de polietileno en hormigón controla el agrietamiento. Los autores encontraron que, para optimizar el control de agrietamiento por contracción plástica, una fibra más fina es más efectiva que una gruesa, mientras que una fibra más larga es más efectiva que una corta. Encontraron que las fibrilaciones (fibras de 1000 denier de diámetro por 12,5 mm de largo) resultan efectivas también para controlar este parámetro.

Gómez y col. [224], encontraron que al agregar PEAD a una mezcla de mortero se pierde resistencia tanto a flexión como a compresión. No pudieron establecer si efectivamente existe una relación entre el porcentaje de adición y la baja en la resistencia, pero sí lograron determinar que con adiciones de PEAD del 0,2 al 0,5% se logran resistencias aceptables para construcciones que no tengan que soportar grandes cargas durante el uso. Encontraron también que la adición de PEAD contribuye a disminuir la permeabilidad del mortero ya que la absorción de agua disminuye.

En síntesis, la incorporación de diferentes tipos de plásticos en matrices cementicias tanto como adición o en reemplazo porcentual de agregados finos, tiende a disminuir la densidad lo que por un lado genera mampuestos livianos y con capacidad aisladora de por ejemplo, temperatura, pero por otro lado, la naturaleza hidrofóbica del plástico, la geometría laminar y corta y la textura lisa generan falta de cohesividad entre las fases de la mezcla, lo que se traduce en poros más grandes, que producen agrietamientos, ingreso de agua y finalmente baja resistencia a la compresión y una escasa durabilidad. De todas maneras, las mezclas pueden ser utilizadas para la producción de mampuestos que pueden ser aplicados en construcciones como cerramiento, en zonas de baja humedad y así se aprovecha un residuo en desuso y que se produce en grandes cantidades y de manera constante, se logran generar materiales de construcción livianos e innovadores y se favorece al cuidado del ambiente.

#### 4.1.3. Los agregados de plásticos reciclados de RAEEs en el hormigón

La incorporación de plásticos de RAEE en matrices cementicias en forma de partículas o fibras, es uno de los materiales compuestos que en las últimas décadas viene siendo estudiado ampliamente, debido al impacto del residuo en el ambiente y la necesidad de incorporarlo en la industria de la construcción.

Kumar y Baskar [160], [225], [226] han publicado trabajos de incorporación de plásticos de HIPS provenientes de RAEEs en mezclas de hormigones y, como fue mencionado en el Capítulo 3, su trabajo constituye un antecedente relevante para este trabajo ya que son los únicos al momento que consideran la lixiviación de metales pesados del plástico dentro de una matriz cementicia. Pero, sin embargo, no tuvieron en cuenta el antimonio en su evaluación. En estos trabajos se evaluó las propiedades mecánicas de hormigones con HIPS proveniente de plástico de residuos electrónicos como agregado grueso en diferentes porcentajes de reemplazo. Se encontraron buenas propiedades mecánicas, pérdida de peso y densidad con reemplazos de hasta el 50% obteniendo hormigones para elementos no estructurales. En un artículo más reciente [66], los autores evaluaron el efecto de la temperatura y choque térmico en las

propiedades físicas y mecánicas del hormigón que incorpora residuos electrónicos. Resultó que tanto la resistencia a la compresión como al choque térmico, se redujeron al someter a la pieza a altas temperaturas y a medida que se aumentaba el porcentaje de HIPS. Por estos motivos los autores sugieren darles a los mampuestos, usos no portantes.

Lakshmi y Nagan [227], reemplazaron parcialmente al agregado grueso natural con residuos electrónicos en general y alcanzaron buenas propiedades de resistencia a la compresión, flexión y tracción. Luego, en un segundo trabajo [68], con las mismas condiciones se evaluó la estructura interna de los poros en los componentes, su resistencia química a los agentes ambientales y reactividad ante algunos componentes del cemento. Los resultados indicaron que el reemplazo del agregado grueso por residuos electrónicos puede arrojar mejores resultados que los del patrón.

Makri y col. [36], investigaron también sobre el uso de plásticos ABS provenientes de RAEE en morteros de cemento. Los autores encontraron una gran variabilidad en los resultados de resistencia a la compresión, la que atribuyeron principalmente a la distribución granulométrica del plástico en la matriz de cemento y la relación agua/cemento. Debido a que mantuvieron relaciones agua/cemento constantes, los autores se enfocaron directamente en la granulometría como causa principal y concluyeron que, debido a esto, el ABS de RAEEs puede aplicarse como agregado en cemento en pequeñas cantidades y en ciertas aplicaciones como revestimientos externos.

Popovici y col. [228], también desarrollaron morteros con plásticos de RAEE. Encontraron una buena resistencia a la flexión producto de la elasticidad propia del plástico, pero con una mayor demanda de agua. Para la compresión, que fue comparada con valores estándar de resistencia de yeso de mortero y mortero de mampostería, los valores resultaron menores. Los autores atribuyen la diferencia principalmente a la forma heterogénea del plástico, la relación agua cemento, la resistencia propia del agregado y la actividad puzolánica. Concluyen entonces que, debido a sus propiedades mecánicas, el material puede ser aplicado en materiales decorativos, elementos articulados y livianos.

Alqahtani y Iqbal Khan [229] , crearon hormigones livianos a partir del recubrimiento de partículas plásticas. El proceso, que ya ha sido presentado en el Capítulo 2 consistió en mezclar plástico de LDPE reciclado y triturado con fibras inorgánicas (arcilla, cenizas volantes, arena), comprimiéndolo en un molde y luego sometido a alta temperatura para fundir el plástico. Se formó una lámina compuesta que luego se trituró, formando así el árido compuesto (Figura 4.7)



*Figura 4. 1: Muestras de diferentes tipos de agregados gruesos desarrollados por Alqahtani y Iqbal Khan et al. [154][229].*

Los resultados arrojaron una reducción en la penetración de cloruros, lo que impacta en una buena durabilidad del material, pero también una reducción en la resistencia a la compresión que limita al material a ser aplicado sólo en compuestos no portantes.

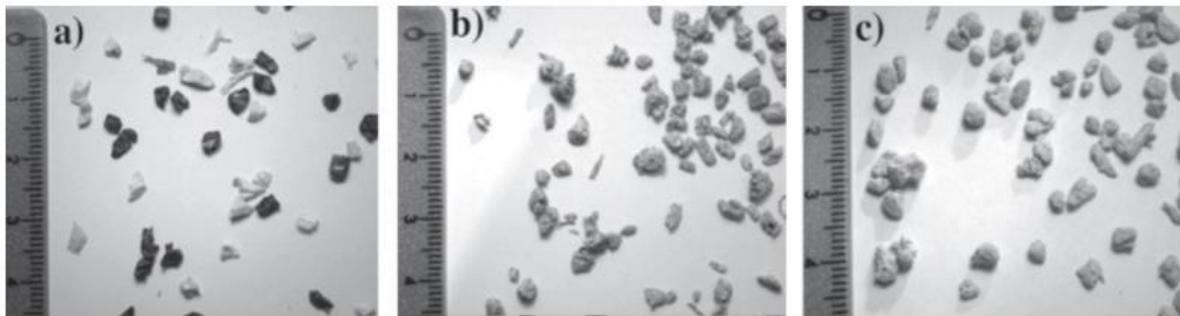
El trabajo de Alqahtani [154] configura un antecedente de alta relevancia para esta tesis a la hora de evaluar propiedades mecánicas ya desarrolla un proceso de encapsulado o recubrimiento, combinando materiales y creando así un agregado compuesto con diferentes fases que interactúan entre sí de manera compleja. Sin embargo, este trabajo no considera los aspectos químicos como los BFR o los metales pesados. Estos factores son determinantes para esta tesis y constituyen el condicionante principal para definir el componente que se va a desarrollar.

#### 4.1.4. Los agregados de plásticos reciclados de RAEEs en el hormigón – experiencia CEVE

Junto al grupo de trabajo que acompaña esta tesis, se comenzó desarrollando experiencias, análisis y ensayos relacionados al reciclado del plástico de RAEE.

Basándose en las investigaciones detalladas anteriormente, se comenzó a experimentar con recubrimientos de cemento en partículas de FPR triturado. De esta manera. Parámetros como dosificación, aditivos, técnica de encapados, relaciones agua/cemento y luego en el mortero, relaciones agregado/cemento fueron determinadas. Se desarrollaron muestras con una, dos y tres capas de cemento sobre la partícula de FPR, con el objetivo de evaluar parámetros de forma y granulometría y diferentes aditivos reciclados como reemplazo del cemento portland.

Las partículas de FPR triturado y luego las mismas encapadas con cemento y aditivos se muestran en las imágenes de la Figura 4.8 a, b y c respectivamente.



*Figura 4. 2: muestras de partículas de FPR triturado y FPR recubierto con capas de cemento.*

Luego de las experiencias con la formación de los primeros agregados, (identificados a partir de ahora como “APR” por las siglas de “agregado de plástico reciclado”) se fabricó en las instalaciones del CEVE, APR con FPR para desarrollar análisis químicos y análisis granulométricos y de tamaño y forma. Asimismo, se procedió a elaborar probetas para su evaluación mediante ensayos mecánicos.

Lotes de FPR#3 y FPR#8 fueron separadas y no fueron recubiertas para ser luego incorporadas directamente en la matriz cementicia como agregado con el objetivo de que dichas muestras sirvan como patrones en los ensayos subsiguientes. Esta comparación aportará mayor claridad a la hora de demostrar la eficiencia de la neutralización de lixiviados e incluso evaluar propiedades mecánicas.

Las probetas se moldearon según la norma IRAM 1622: Cemento Portland. Determinación de resistencias mecánicas [15].

En una primera serie exploratoria se utilizó FPR#3 como agregado en la mezcla de mortero. Esta elección se rigió por criterios de practicidad y constituyó una primera experimentación que será completada más adelante. Luego, se emplearon los APR como material de carga en el mortero y fueron denominados FPR#3@CPF por estar la FPR#3 encapsulada con cemento portland (CPF). Ambas muestras se presentaron en dos relaciones agregado: cemento; 1:6 y 1:4 en volumen respectivamente. También se incorporó una

probeta patrón con arena natural como agregado con relación agregado:cemento de 1:6. La relación agregado:cemento seleccionada para la probeta de arena responde a que se busca comparar los comportamientos entre este y los agregados de APR y FPR. Para esto, entre estos tres tipos de agregado, se mantiene la relación 1:6. Luego, entre las probetas con APR y FPR y relación agregado:cemento 1:4 se busca establecer comparaciones de eficiencia entre las muestras con el APR para evaluar, ya que el comportamiento de la probeta con arena ya fue evaluado y no se esperan grandes cambios al cambiar esta variable. El ligante elegido, entonces fue Cemento Portland con filler (CPF40). La relación en masa agua/cemento fue la usada por Manjuntah [149]; 0,5 pero ajustada a mano para cada mortero. Una vez elaboradas las probetas, fueron desmoldadas a las 24 horas y curadas durante 28 días en condiciones de saturación de humedad a 25 °C. A los 28 días se ensayaron a resistencia a la compresión simple. Los ensayos se realizaron con una prensa hidráulica accionada eléctricamente, con una velocidad de descenso de 0,7 mm/s. Las diferentes dosificaciones de las probetas y los resultados de resistencia a la compresión simple se muestran en la Tabla 4. 1.

*Tabla 4. 1: Muestras y resistencia a la compresión.*

Entrada	Agregado (g)	Cemento (g)	A:C	Resistencia (MPa)	
1	FPR#3	144	50	1:6	1,8
2	FPR#3@CPF	197	50	1:6	4,6
3	Arena	407	50	1:6	9,7
4	FPR#3@CPF	197	75	1:4	5,3

Como se observa en la Tabla 4.1 la resistencia a la compresión simple de las probetas de RAEE (Entrada 1) no supera los 2 MPa por lo que el mampuesto sólo podría ser empleado como material de cerramiento, mientras que la resistencia de las probetas elaboradas con el APR FPR#3@CPF (Entrada 2) superan ampliamente a las anteriores. El empleo del APR FPR#3@CPF no sólo mejora el desempeño de las probetas al ensayo de compresión simple, sino que dicho valor de resistencia se encuentra por encima de lo estipulado por el reglamento para mampuestos que son aceptados para emplearse como material portante. La resistencia a la compresión con relación agregado-cemento de 1:4 de las probetas FPR#3@CPF no es significativamente mayor que para una relación agregado-cemento 1:6 (Entradas 2 y 4). El porcentaje de cemento total presentado en la tabla tiene en cuenta el cemento necesario para la elaboración del correspondiente APR y el cemento necesario para elaborar la probeta, por esto las probetas de plástico FPR son las que menor proporción de cemento presentan, al mismo tiempo estas probetas son las que presentan una menor resistencia a la compresión.

Puede concluirse con estos resultados que el agregado formado recubriendo la partícula plástica con cemento, muestra muy buenas propiedades mecánicas, con valores de resistencia a la compresión aceptables, menor que el agregado tradicional, pero con un incremento importante con respecto al plástico sin recubrir.

Luego de esto se procedió a evaluar la capacidad del cemento como estabilizante de contenidos metálicos. Se pudo determinar que en los morteros en los que se incorporó el APR, los metales pesados se estabilizan en la matriz cementicia. La cuantificación se llevó a cabo mediante el tratamiento con digestión ácida con agua destilada y luego la determinación de concentración por espectrofotometría de

absorción atómica. En la Tabla 4. 2 se muestran los resultados de la cuantificación de los principales metales presentes en agregados consistentes en plásticos de FPR y en APR del tipo FPR#3@CPF.

Tabla 4. 2: Estabilización de metales en matriz cementicia.

Metal	FPR	FPR#3@CPF
Cu	Nd	Nd <sup>10</sup>
Zn	51,83	Nd
Pb	154,74	Nd
Cr	Nd	Nd
Sb	740,48	Nd

Podemos ver en la tabla que, los metales pesados pueden neutralizarse de manera eficiente en la matriz cementicia. Más allá de los resultados obtenidos en resistencia mecánica y estabilización de metales, que fueron aceptables, se observó una coloración amarillenta que fue formándose con el paso de los días, durante el proceso de fraguado de las muestras hasta alcanzar la edad requerida para el ensayo (28, 60 y 120 días). La misma coloración se desarrolló en los agregados sueltos en contacto con el aire y en las aguas de curado de las probetas. Imágenes de la Figura 4. 3.



Figura 4. 3: coloración amarillenta de las muestras en contacto con rayos UV.

Se pudo comprobar luego de una revisión bibliográfica, que dicha coloración responde a que los compuestos orgánicos se comportan de manera diferente que los compuestos metálicos. Al agregar FPR directamente en la mezcla o bien, al encapsular cada partícula sólo con cemento, se genera un producto de descomposición de los retardantes de llama BFRs en presencia de la luz UV. En estos casos es posible inferir que, debido a la naturaleza química de los grupos funcionales presentes en los retardantes de llama, provenientes principalmente de la familia de los bifenilos polibromados, en medio básico del agua cementicia se produce la deprotonación de los grupos hidroxilos y por tanto su solubilización en agua, que resulta finalmente en la migración a la superficie [230] (Figura 4.10)

<sup>10</sup> No detectado.

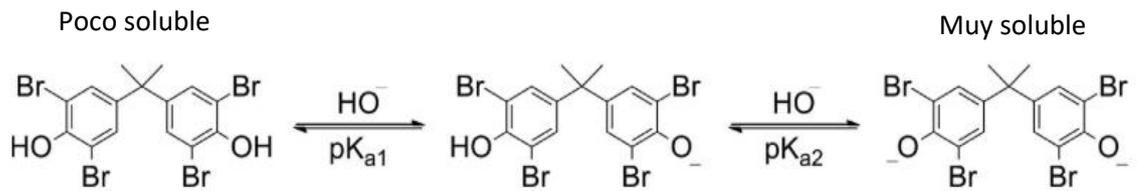


Figura 4. 4: equilibrio ácido-base de TBBPA

#### 4. 2 Conclusiones del capítulo

Se concluye que más allá de las factibilidades técnicas que ya han sido evaluadas por otros autores, el principal condicionante a tener en cuenta del material que aquí se desarrolla es el del lixiviado de metales pesados y compuestos bromados. Por experiencias sencillas y cualitativas desarrolladas durante las primeras etapas experimentales y estudio bibliográfico se comprobó que los contaminantes metálicos presentes pueden ser estabilizados por la matriz cementicia, pero los principales contaminantes orgánicos, que son los retardantes de llama se desestabilizan por lo que es necesario utilizar algún estabilizante para inhibir la salida de los compuestos.

El plástico de RAEE triturado no puede ser utilizado directamente como agregado debido a los compuestos contaminantes que podrían lixiviar del material compuesto. Sin embargo, es posible aplicar ciertas estrategias para la estabilización de este compuesto en la matriz cementicia mediante el uso de adiciones.

Estrategias de estabilización/ neutralización junto a métodos de combinación de cemento y FPR que ya han sido informados por otros autores como Alqahtani y col. [154] constituyen las bases para desarrollar un nuevo sistema de encapsulado que permite obtener un nuevo agregado reciclado con base polimérica que, al mismo tiempo controle el lixiviado de agentes peligrosos.

## CAPITULO 5. DESARROLLO DE AGREGADO DE PLASTICO RECICLADO A PARTIR DE LA FPR

En este capítulo, en el apartado 5.1 se presenta la propuesta de un Agregado de Plástico Reciclado (APR) y su programa experimental; en el apartado 5.2 se describen los materiales que componen el agregado desarrollado, el sistema y el procedimiento de mezclado seleccionado para su elaboración. En el apartado 5.3 se presentan las mezclas de mortero cementicio preparadas para la elaboración de probetas con los distintos APRs.

## 5.1. Introducción

En este capítulo se desarrolla el procedimiento propuesto para la elaboración de un árido reciclado al que se denominó con la misma designación del correspondiente a las pruebas desarrolladas en el capítulo 4. APR por “agregado (o árido) de plástico reciclado”. Este material se presenta como un material para morteros. Como material compuesto, el agregado en el mortero formaría lo que constituye el “material de refuerzo” mientras que el cemento funcionaría como “matriz”. La fracción plástica de RAEE triturada constituye la materia prima principal del sistema y ya fue descrita y caracterizada en el capítulo 3. Resta entonces caracterizar los materiales que funcionarán y actuarán de forma sinérgica para resolver los inconvenientes de la FPR, que fueron presentadas en el capítulo anterior y así poder ser incorporado en la matriz cementicia.

En base a los antecedentes presentados en el capítulo anterior [231] [232], las combinaciones de plásticos de RAEE con matrices cementicias presentan, debido a su combinación; buenas propiedades mecánicas aptas para cerramientos y constituyen un material compuesto liviano y con propiedades aislantes [160], [225]–[227], [233]. Pero, como ya se mencionó en el Capítulo 2, de los datos obtenidos existe sólo una investigación que contempla el estudio de los lixiviados de metales pesados en el agua [234] que a la vez, no contempla el lixiviado específico del Sb, aditivo metálico que se aplica como sinérgico en plásticos que contienen BFRs, específicamente TBBPA [3], [9], [161]–[164]. Que, como se menciona en el capítulo anterior, el cemento potencia el lixiviado de TBBPA, producto de dos grupos hidroxilos aromáticos ionizables [235].

Por este motivo, es condición imprescindible que el sistema del APR en base a FPR constituya un material capaz de revertir este comportamiento y estabilizar dichos contaminantes.

En este sentido, se propone un sistema de encapsulado de las partículas plásticas con capas sucesivas de cemento, adiciones y agua para generar un agregado de plástico reciclado que pueda ser incorporado a morteros como reemplazo de agregados naturales finos y a la vez establezca los contaminantes tanto metálicos como orgánicos en la matriz cementicia.

Para lograr esto, se empleó una nueva estrategia de estabilización por solidificación y se analizaron diferentes combinaciones de plástico en matriz cementicia; plástico encapsulado con cemento en matriz de cemento; plástico encapsulado con cemento en matriz de arena y cemento; y, por último, plástico encapsulado con cemento y aditivos en matriz cementicia.

## 5.2. Materiales del APR

Se presentan los criterios de diseño de las mezclas, los materiales empleados y las dosificaciones diseñadas. Los componentes utilizados son FRP, cemento, cemento de albañilería, residuos de producción de porcelanato, bentonita, carbón activado, carbón vegetal, agua y sus características se describen en las siguientes secciones.

### 5.2.1. Fracción plástica de RAEE

La materia prima principal, ya caracterizada en el Capítulo 3 fue suministrada por una empresa de reciclaje de la Provincia de Santa Fe que se dedica a recolectar y procesar todo tipo de desechos de equipos eléctricos y electrónicos. Triturada por la empresa y sin separación previa por color u origen, la FPR es recibida en dos tamaños diferentes de granulometría 3 mm (FPR#3) y 8 mm (FPR#8), con una densidad

aparente de 53,87 kg/m<sup>3</sup> para FPR#3 y 56,72 kg/m<sup>3</sup> para FPR#8. En las imágenes de la Figura 5. 1 se muestran ambos tamaños.



Figura 5. 1: FPR en granulometrías 3 mm (FPR#3) y 8 mm (FPR#8).

#### 5.2.2. Cemento Portland

Se empleó Cemento Portland con Filler CPF40 con una gravedad específica y finura de 3150 kg/m<sup>3</sup> y 3500 cm<sup>2</sup>/g, respectivamente. El mismo, según datos del fabricante, se obtiene a partir de la molienda conjunta de Clinker Portland, rocas calcáreas de alta pureza, pequeñas cantidades de yeso y aditivos. Destinado a usos generales, se caracteriza por su alta trabajabilidad, baja demanda de agua y poca tendencia a la fisuración. Además, al desarrollar una elevada resistencia a todas las edades, proporciona mayor seguridad estructural.

En general, los cementos Portland son aquellos que se utilizan en la elaboración de hormigón para elementos estructurales tanto simple como armado que no requieran propiedades especiales de durabilidad (riesgo de ataque por sulfatos, posibilidades de estar sometidos a condiciones de humedad y temperatura en forma permanente o semipermanente, riesgo de fisuración por efectos térmicos, etc.), resistencia, color, etc.

En el reglamento CIRSOC 201 [184] se determina que, en Argentina, los cementos de uso general deben cumplir los requerimientos de la norma IRAM 50000 [236]. La misma clasifica los cementos en las siguientes categorías según la posibilidad de su aplicación. En la Tabla 5.1 se presentan los tipos de cemento que contempla el Reglamento.

Tabla 5. 1: tipos de cemento según Reglamento CIRSOC 201

Tipo de cemento	Nomenclatura	A usar en hormigón
Cemento portland normal	CPN	Simple, armado o pretensado
Cemento portland con "filler" calcáreo	CPF	
Cemento portland con escoria	CPE	
Cemento portland compuesto	CPC	
Cemento portland puzolánico	CPP	
Cemento de alto horno	CAH	Simple o armado

Luego en la Tabla 5.2 puede verse la composición del cemento utilizado.

Tabla 5. 2: composición del cemento utilizado

Nombre	Nomenclatura	Composición (% en masa)			
Cemento Portland con "filler" calcáreo	CPF	Clinker +	Puzolana	Escoria	Filler
		Sulfato de	(P)	(E)	calcáreo
		Calcio			(F)
		99-80			1-20

### 5.2.3 Cemento de albañilería

Como alternativa al cemento portland convencional, y luego del estudio bibliográfico luego del cual se concluyó que este tipo de mampuestos formados por áridos de origen plástico no resultan generalmente aptos para construcciones estructurales; se utilizó en este trabajo, cemento de albañilería o *Masonry Cement* (MC) en inglés tipo MC 12.5 [237]. Las propiedades del cemento de albañilería deben cumplir con la norma IRAM 1685 y entre estas se desataca una mayor plasticidad, menor consumo de agua, y buena resistencia a la compresión. No presenta la misma resistencia del cemento portland convencional por lo que se utiliza principalmente en revoques y mampostería pero cumple de todas maneras con los requerimientos técnicos y económicos que aquí se persiguen. La composición del MC de acuerdo a la norma EN 413-1 [238], se muestra en la Tabla 5.3

Tabla 5. 3: composición del cemento de albañilería

Nombre	Nomenclatura	Composición (% en masa)			
Cemento de Albañilería o <i>Masonry Cement</i>	MC	Clinker	Piedra caliza	Aditivos	Yeso
			pulverizada	orgánicos	
		~40	~60	<1	~1

La composición de este MC es de al menos el 40 % en peso de Clinker de cemento Portland, piedra caliza pulverizada en porcentaje relativamente alto (es decir, 50-60 %), una baja proporción de yeso y menos del 1% en peso de aditivos orgánicos. El uso del cemento de albañilería presenta su fundamento desde el punto de vista de su trabajabilidad gracias a la incorporación de filler calcáreo en su composición y en el hecho de que es un material de fácil acceso tanto logística como económicamente.

### 5.2.4 Adiciones

#### 5.2.4.1 Bentonita

Se incorporó a la mezcla, Bentonita (BT) comercial que según su ficha técnica contiene una porción elevada de montmorillonita, silicato de aluminio coloidal hidratado de origen natural. Datos Físico-Químicos: Polvo algo granuloso, de color beige. Poco soluble en agua, prácticamente insoluble en etanol y en éter.

#### 5.2.4.2 Carbón activado y vegetal

El Carbón Activado (CA) es un material adsorbente de sustancias orgánicas de amplio espectro. Es sabido que las adiciones, tipo arcillas organofílicas y carbón activado incorporados al cemento son efectivos para desarrollar sistemas de solidificación/estabilización de componentes orgánicos [239].

La denominación y determinación del número de yodo junto a la estimación de área superficial específica se detallan en la Tabla 5. 4.

Tabla 5. 4: número de yodo y área superficial específica de muestras de carbón activado.

Serie	Muestra	Denominación	Productor	Numero de yodo <sup>1</sup>	S <sub>BET</sub> <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> /g)
1	CAE 061	061	Clarimex	552	544
2	MMF	MMF	Clarimex	764	755
3	CAE Ultra	CU	Clarimex	792	783
4	CLARISORB B	CB	Clarimex	794	785
5	Merck	MK	Merck	777	768
6	Vegetal	CV	Proveedor local	124	112

<sup>1</sup>Determinación acorde a la norma ASTM D 4607 [240].

<sup>2</sup>Área superficial específica (S<sub>BET</sub>) estimada a partir del número de yodo (IN): S<sub>BET</sub>= (0,9946 x IN) – 4.91 [241].

El carbón vegetal en polvo se obtuvo de un proveedor local. Para obtener una muestra homogénea, el mismo se tamizó con un tamiz de 75 µm (malla de 200). Es un material combustible sólido, frágil y poroso con alto contenido de carbono que se produce por combustión de madera o residuos vegetales. Presenta valores máximos de superficie específica de hasta 2 m<sup>2</sup>/g. Las partículas de carbón tienen en su estructura interna, una gran cantidad de cavidades o intersticios que alojan el material volátil (sustancias alquitranadas) que se forma durante la carbonización; estas áreas tienen una menor capacidad de adsorción que el carbón activado [242].

#### 5.2.5. Agua

Se utilizó agua de red que cumple con los requisitos establecidos en el reglamento CIRSOC 201 [184] y en la norma IRAM 1601 [243].

### 5.3. Metodología

#### 5.3.1. Estrategia para la obtención del APR

Para la obtención del APR se propone un sistema de encapsulado que consiste en un método de *core-shell* (núcleo-encapado) que consiste en ir aplicando capas de cemento y adiciones a la partícula, la cual funciona como núcleo, de manera tal, de generar un agregado para morteros con una forma y granulometría aptas, capaz de retener los componentes indeseados en la matriz. En el gráfico de la Figura 5. 2 se resume el sistema de producción del APR [232].

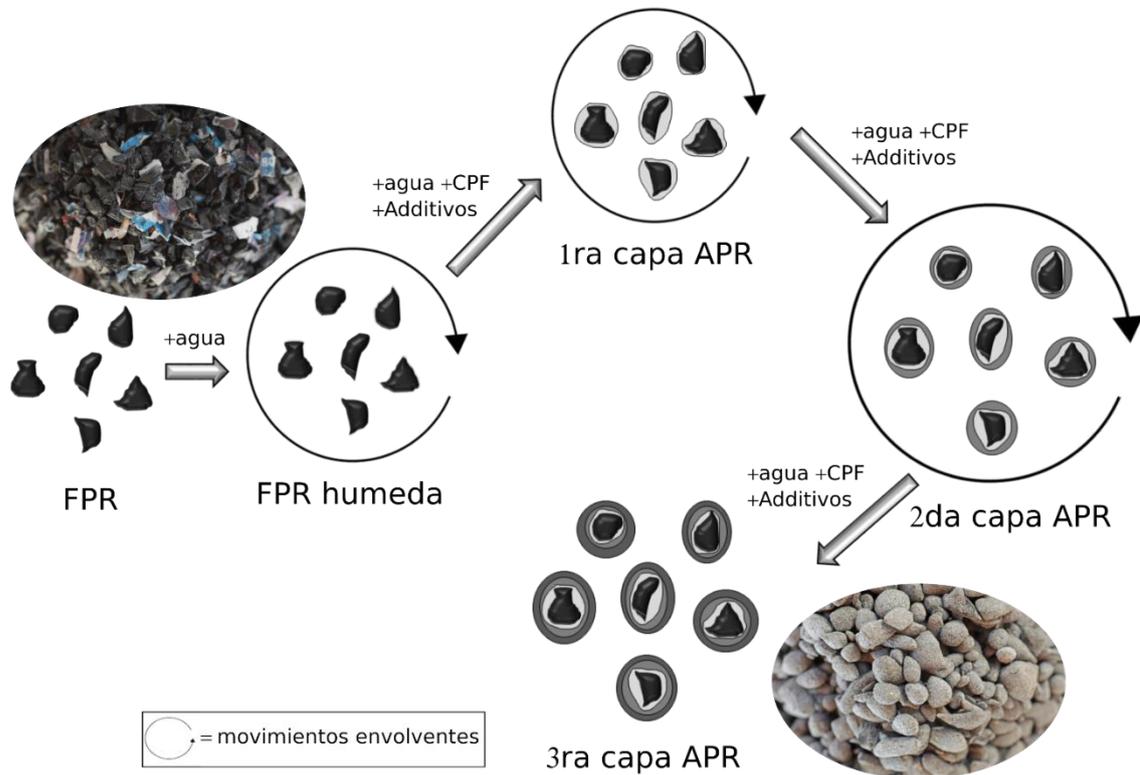


Figura 5. 2: sistema Core-Shell de encapsulado para solidificación/ estabilización de contaminantes.

### 5.3.2. Variables

Durante la etapa exploratoria se fueron estableciendo diferentes variables de acuerdo a las mismas experiencias que se iban adquiriendo con el material. En este sentido, dos series de muestras de agregados fueron desarrolladas (5.5 y 5.6).

En la primera serie las variables que se establecieron fueron.

- Tipo de agregado: se desarrollaron diferentes tipos de agregados consistentes en APR y FPR sin recubrir.
- Número de capas: se desarrollaron muestras con una, dos y tres capas de CPF para formar el "Shell".
- Adición: se desarrollaron muestras con el agregado de carbón activado y bentonita y otras sin adición.

Luego de las primeras experiencias y resultados; en la serie dos se establecieron las siguientes variables.

- Tamaño del agregado: tanto para el APR como para la FPR se trabajaron dos tamaños diferentes de granulometría: 3 y 8 mm.
- Recubrimiento: partículas sin recubrir y partículas con recubrimiento.
- Material del recubrimiento. Con cemento de albañilería, con carbón activado y combinación de estos.

- Tipo de carbón activado: diferentes tipos/marcas de carbón activado disponibles comercialmente.
- Porcentaje de adición de carbón activado: Carbón activado en diferentes porcentajes de adición en relación masa cemento/carbón.
- Incorporación de carbón vegetal: Reemplazo de carbón activado por carbón vegetal disponible comercialmente en diferentes porcentajes de adición.

### 5.3.3. Procedimiento de mezclado

Vemos en la Figura 5. 2, que el procedimiento inicia con la partícula plástica triturada para luego ser encapsulada de la siguiente manera:

- Primero, se coloca la FPR (núcleo) en la máquina mezcladora y se agrega agua para humedecer las partículas de plástico.
- A continuación, se agrega la mezcla cementicia (cemento + aditivos + adiciones) para la cáscara lentamente y se mezcla a mano con movimientos envolventes.
- La carcasa se conforma en tres capas, con un tiempo de espera de 24 h entre capas. Además, las partículas son tamizadas con un tamiz de 4,8 mm (4 mallas) entre cada capa.
- Finalmente, los APR se curan por inmersión en agua durante 14 días.

De lo observado en la Figura 5. 2, el sistema comienza con la partícula al descubierto y luego el proceso consiste en recubrir la misma con capas sucesivas de cemento y adiciones. En este sentido, el material de recubrimiento se prepara, luego se divide en tres partes, las cuales serán aplicadas durante la formación del Shell una detrás de la otra con una diferencia de 24 h entre capas. El lapso ensayado responde a la necesidad de fraguado de la mezcla para soportar un nuevo encapsado.

El recubrimiento se desarrolla introduciendo las partículas en una máquina hormigonera convencional de 130 litros a la cual se le extraen las paletas para que las mismas no interfieran en el proceso de encapsado. Una vez introducido el APR en la mezcladora, se añade agua para humedecer las partículas y así lograr una mejor adherencia del cemento, la máquina mezcladora comienza con el amasado. Una vez iniciado el proceso, se introduce la primera parte de material de encapsado (cemento + adición) y se continúa por un tiempo de 10 minutos. Luego, de cada encapsado el APR se extrae de la máquina y se esparce en una zona plana o en el suelo para su secado a temperatura ambiente. Luego de 24 h, el material se vuelve a recolectar, es tamizado para evitar que las partículas queden unidas y es introducido nuevamente en la mezcladora para proceder al segundo encapsado. Lo mismo se vuelve a repetir con el tercer encapsado. Una vez formada la partícula, su forma se asemeja a la de un agregado natural.



Figura 5. 3: materiales del APR.

De acuerdo a las diferentes variables en cuanto a la conformación de la mezcla, pueden producirse diferentes tipos de APR. Con o sin incorporación de carbón activado o carbón vegetal, con o sin bentonita, combinaciones de carbón activado y bentonita o sólo con cemento de albañilería son algunos ejemplos de muestras cuyas dosificaciones de detallarán en la Tabla 5. 5 y en la Tabla 5. 6. El aspecto final de los APR de manera general, se muestra en la Figura 5.5.

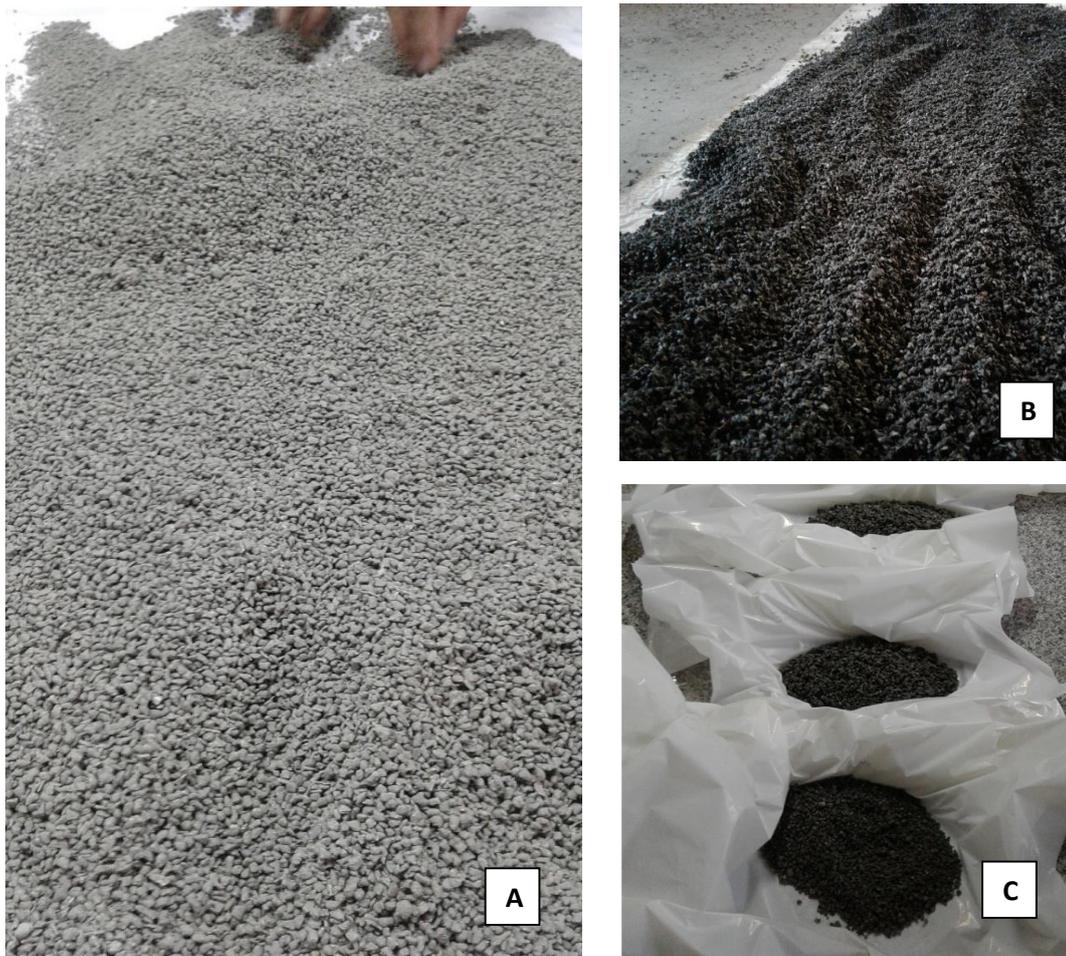


Figura 5. 4: En las fotografías A y B, se muestran los APR en proceso de secado a temperatura ambiente en un ambiente cerrado y seco. En la fotografía C, se muestra el APR tamizado y separado por tamaños.

#### 5.3.4. Mezclas y dosificaciones

El diseño de dosificación de las muestras contó con dos etapas que estuvieron relacionadas a diferentes etapas exploratorias del grupo de trabajo. A las muestras correspondientes a la primera etapa se las denominó de la Serie 1 y a las muestras desarrolladas durante la segunda etapa se las denominó de la Serie 2. Las muestras de la Serie 1 fueron realizadas con cemento Portland y Carbón activado como material de "Shell". Asimismo, en esta serie se decidió proponer muestras con una sola capa de Shell, con dos y con tres, para determinar si este factor interviene en la neutralización de contaminantes. Respecto a esto, la cantidad de material adicionado fue la misma independientemente de la cantidad de capas. También en las muestras con 3 capas de Shell, se incorporó bentonita en la mezcla. En la entrada 10, como reemplazo de carbón activado y en la entrada 11 incorporando ambas adiciones. Siempre con el objetivo de evaluar el mejor agente estabilización o combinación de los mismos.

Las muestras de la serie 2 fueron diseñadas reemplazando el cemento portland por cemento de albañilería. Esta decisión radicó en que el material resulta más económico que el CPF ya que contiene adiciones que reemplazan el Clinker y más allá de no sea objetivo de este trabajo generar un compuesto o material de carácter estructural, el MC no interfiere en las propiedades finales en general de los materiales que con el mismo se producen. Aquí la bentonita ya no fue incorporada debido a que con los

resultados de las muestras anteriores ya se podría obtener información sobre la neutralización de los componentes orgánicos y metálicos; es decir la modificación del cemento portland por uno que tiene menor contenido de Clinker no interfiere de manera significativa en los resultados. Ya que en la Serie 1, por cuestiones de practicidad y disponibilidad del momento se desarrollaron las muestras con el tamaño de FPR de 3mm (FPR#3), para la serie 2 se incorporaron las muestras con FPR#8. Los diferentes tamaños de árido irán siendo analizados en diferentes ensayos seleccionando cada uno o los dos según la información que se esté buscando.

Finalmente, en la Serie 2, se incorporaron muestras con diferentes tipologías de carbón activado en diferentes porcentajes de adición. Con esto se buscó obtener información sobre el tipo y porcentaje óptimo para neutralizar contaminantes. Con el mismo criterio se incorporaron mezclas con carbón vegetal en reemplazo del carbón activado. Esta modificación responde a criterios económicos y prácticos. Resulta más económico y sencillo de conseguir este tipo de carbón, pero de igual forma es necesario evaluar si el carbón vegetal presenta la capacidad de neutralizar componentes orgánicos como el carbón activado. Por este motivo, muestras con diferentes tipos de carbón activado y carbón vegetal serán evaluadas a nivel de neutralización de contaminantes orgánicos.

En las tablas 5.5 y 6.6 se presentan entonces las dosificaciones diseñadas correspondientes a la Serie 1 y Serie 2 respectivamente. Se designó cada mezcla con las letras correspondientes a la sigla de la naturaleza del *core*; "FPR" luego el símbolo "@" como separador del *shell* que puede estar compuesto por CPF (cemento portland), MC (cemento de albañilería), CA (carbón activado), BT (bentonita) y/o CV (carbón vegetal).

Todas las muestras se elaboraron a partir de 500 g de FPR triturado. En las muestras de la Serie 1, en FPR#3@CPF se recubrieron los 500 g de FPR con 300 g de CPF y 120 mL de agua. Con el material en una capa en la entrada 3, en dos capas en la entrada 4 y en tres capas en la entrada 5. Luego en FPR#3@CPF:CA, se agregó el carbón activado y el encapado se preparó con 300 g de CPF, 300 g de polvo de cuarzo, 50 g de CA y 240 ml de agua. En FPR@CPF:BT, la mezcla se preparó con 300 g de CPF, 300 g de polvo de cuarzo, 125 g de BT y 240 ml de agua, finalmente para FPR@CPF:BT:CA se preparó la mezcla con 300 g de CPF, 300 g de polvo de cuarzo, 125 g de BT y 50 g de CA con 240 ml de agua. El carbón activado en la Serie 1 fue el de marca "Merck", un carbón activado de máxima pureza que presenta un elevado costo y se destina principalmente a su uso en laboratorios o de uso científico. Este carbón fue reemplazado en la Serie 2, respondiendo al criterio de viabilidad técnica y económica, por carbones activados de uso comercial y más económicos.

Luego en la serie 2 se presentan las muestras con cemento de albañilería (MC) en reemplazo del CPF y el filler y se incorporan el CV, en dos granulometrías diferentes; 3 mm y 8 mm. FPR@MC:CA se preparó con 500 g de FPR recubiertas con 300 g de MC, 50 g de CA, y 240 mL de agua.

También, a las muestras con carbón activado se les modificó el tipo de carbón y porcentaje de adición en peso. Se desarrollaron muestras entonces con CA en porcentajes de adición de 1, 2, 3 y 4%. Aquí la nomenclatura agrega luego de FPR#3@MC:CA, y separado por una barra (/), el tipo de carbón activado cuya denominación se extrae de la Tabla 7.4 en donde, en la columna "denominación" se muestra cómo se designó a cada tipo de carbón activado. Luego de esto y seguido de un guion medio (-) se indica el porcentaje de CA que presenta la muestra. Finalmente, se presentan las muestras con carbón vegetal (CV) con porcentajes de adición de 1, 2, 3, 4, 20 y 30% en reemplazo del CA y siguiendo la misma nomenclatura.

Tabla 5. 5: serie 1 de la dosificación del APR.

Entrada	Muestra	Capas	Adición	Cantidad de adición (% m/m)
1	FPR #3 <sup>1</sup>	-	-	
3	FPR#3@ CPF	1	-	
4	FPR#3@ CPF	2	-	
5	FPR#3@ CPF	3	-	
9	FPR#3@ CPF:CA <sup>2</sup>	3	CA	4,3% de CA
10	FPR#3@ CPF:BT <sup>2</sup>	3	BT	10,2 % de BT
11	FPR#3@ CPF:BT:CA <sup>2</sup>	3	BT + CA	9,8%BT y 3,9% de CA

<sup>1</sup> En ambas series se agregaron muestras de plásticos sin recubrir para establecer comparaciones con los APR.

<sup>2</sup> En estas muestras, el Shell tiene una cantidad de polvo de cuarzo como filler en una cantidad equivalente al CPF.

Tabla 5. 6: serie 2 de la dosificación de APR.

Entrada	Muestra	Adición	Cantidad de adición (% m/m)
1	FPR#3		-
2	FPR#8	-	-
3	FPR#3 @ MC <sup>1</sup>	-	-
4	FPR#8 @ MC	-	-
5	FPR#3@MC:CA/061-1	061	1,1
6	FPR#3@MC:CA/061 -2		2,2
7	FPR#3@MC:CA/061-3		3,3
8	FPR#3@MC:CA/061 -4		4,3
9	FPR#8@MC:CA/061-1		1,1
10	FPR#8@MC:CA/061 -2		2,2
11	FPR#8@MC:CA/061-3		3,3
12	FPR#8@MC:CA/061 -4		4,3
13	FPR#3@MC:CA/CU - 1	CAE U	1,1
14	FPR#3@MC:CA/CU - 2		2,2
15	FPR#3@MC:CA/CU- 3		3,3
16	FPR#3@MC:CA/CU - 4		4,3
17	FPR#8@MC:CA/CU - 1		1,1
18	FPR#8@MC:CA/CU - 2		2,2
19	FPR#8@MC:CA/CU- 3		3,3
20	FPR#8@MC:CA/CU - 4		4,3
21	FPR#3@MC:CA/MMF-1	MMF	1,1
22	FPR#3@MC:CA/MMF-2		2,2
23	FPR#3@MC:CA/MMF-3		3,3
24	FPR#3@MC:CA/MMF-4		4,3
25	FPR#8@MC:CA/MMF-1		1,1
26	FPR#8@MC:CA/MMF-2		2,2
27	FPR#8@MC:CA/MMF-3		3,3
28	FPR#8@MC:CA/MMF-4		4,3
29	FPR#3@MC:CA/CB-1	Clarisol B	1,1
30	FPR#3@MC:CA/CB-2		2,2
31	FPR#3@MC:CA/CB-3		3,3
32	FPR#3@MC:CA/CB-4		4,3

33	FPR#8@MC:CA/CB-1		1,1
34	FPR#8@MC:CA/CB-2		2,2
35	FPR#8@MC:CA/CB-3		3,3
36	FPR#8@MC:CA/CB-4		4,3
37	FPR#3@MC:CA/MK-1	Merck	1,1
38	FPR#3@MC:CA/MK-2		2,2
39	FPR#3@MC:CA/MK-3		3,3
40	FPR#3@MC:CA/MK-4		4,3
41	FPR#3@MC: CV-1	Carbon Vegetal	1
42	FPR#3@MC: CV-2		2
43	FPR#3@MC: CV-3		3
44	FPR#3@ MC: CV-4		4
45	FPR#3 @ MC: CV-20		20
46	FPR#3@ MC: CV-30		30
47	FPR#8@MC: CV-1		1
48	FPR#8@MC: CV-2		2
49	FPR#8@MC: CV-3		3
50	FPR#8@ MC: CV-4		4

<sup>1</sup> Todas las muestras de APR en la serie 2 fueron encapadas 3 veces.

En las fotografías de la Figura 5. 5 se muestran algunos de los tipos de APR ya secos y listo para usar.





*Figura 5. 5: A) APR FPR#3@MC, B) APR FPR#8@MC, C) APR FPR#3@MC:CA/MMF, D) APR FPR#8@MC:CA/MMF, D) APR FPR#3@MC:CV-1*

## CAPITULO 6. CARACTERIZACIÓN DEL APR

En el apartado 6.1: Se desarrolla una introducción cuyo principal objetivo es la correcta comprensión del lector sobre el criterio de selección de muestras. En el apartado 6.2 “Neutralización de contaminantes” se presentan los métodos, criterio de selección de muestras y resultados correspondientes a la caracterización química del APR desarrollado. En el apartado 6.3 “Determinación de características físicas” se expone la caracterización física del APR, criterios de selección de muestras. Los métodos coinciden y ya fueron descritos en el capítulo 3. En el apartado 6.4 “Determinación de propiedades mecánicas, durabilidad y capacidad aislante” se presentan; criterio de selección de muestras, métodos y resultados de resistencia a compresión y resistencia a flexión. Luego, se presentan el criterio de selección de muestras, los métodos y resultados sobre succión y velocidad de succión capilar y comportamientos relacionados a los mismos, como el ángulo de contacto y la porosidad. Finalmente, se presentan, el criterio de selección de muestras, los métodos y resultados de conductividad térmica.

## 6.1. Introducción

En este capítulo se desarrolla la caracterización del material propuesto. Partiendo de la gran masa de muestras desarrolladas, el primer objetivo para obtener una caracterización precisa de manera práctica y eficiente que pueda arrojar resultados claros fue establecer un criterio de selección en la búsqueda de propiedades. En este sentido, frente a los resultados obtenidos por otros autores - entre los que se destaca lo desarrollado por Alqahtani y col., [154] quien comprobó que es posible desarrollar áridos reciclados con materiales plásticos de menor densidad y aplicables a elementos no estructurales pero que trabajó solo con un tipo de plástico y no tuvo en consideración el análisis de lixiviados tóxicos, [54] y los resultados de Kumar y Baskar [234], quienes consideraron la presencia de metales pesados en los plásticos, y comprobaron su neutralización en matrices de cemento pero no consideraron al Antimonio – se entendieron los puntos que aún no han sido estudiados dentro del campo y que serán los punto clave para determinar los criterios de relevancia. En este sentido, los criterios se describen a continuación en orden descendente.

- Estabilización/neutralización de contaminantes metálicos y orgánicos: Se priorizará la comprobación sobre la capacidad de la matriz de cemento de neutralizar metales pesados incorporando en la muestra al antimonio. Al mismo tiempo, se desarrollará la comprobación sobre la capacidad del sistema (cemento + aditivo) de lograr estabilizar los BFR, principalmente TBBPA. Como se explicó en el Capítulo 2; El TBBA es el BFR que se usa en la mayoría de los AEE representando alrededor del 60% del mercado [57], por lo tanto, es el TBBPA el compuesto buscado en las muestras. De esta manera se busca completar lo aportado por los otros autores ya mencionados.
- Viabilidad técnica y económica: como fue descrito en el capítulo 2, con este trabajo se busca desarrollar una técnica sencilla y económica que se adapte al contexto del país en relación a tecnologías e infraestructuras disponibles. Al mismo tiempo se busca trabajar con materiales económicos y de fácil acceso para que los sectores menos favorecidos de la sociedad puedan desarrollar su propia tecnología y satisfacer así su necesidad de vivienda.
- Conductividad térmica: debido a su menor densidad frente a los áridos naturales y a la capacidad de los materiales plásticos ya conocida de aislar la temperatura se prioriza esta propiedad frente a las propiedades mecánicas.
- Propiedades mecánicas: frente a los resultados de otros autores que demuestran que la incorporación de plásticos en matrices cementicias disminuye significativamente la resistencia a compresión e interfiere en la adherencia entre matriz/refuerzo se busca que los componentes funcionen como elementos de cerramiento; no portantes o estructurales.

Frente a estos criterios, se han seleccionado ciertas muestras para cada ensayo en particular, avanzando con el siguiente ensayo de acuerdo a los resultados aportados por el ensayo anterior y especificando en cada punto el criterio de selección aplicado. Del apartado 6.2 al 6.3, en donde se evalúan el comportamiento de las diferentes formulaciones frente a los contaminantes y sus magnitudes de tamaño y forma; se evaluaron muestras de agregado. Por su parte, en el apartado 6.4 en donde se buscó conocer la resistencia mecánica, conductividad térmica y succión capilar del APR como agregado dentro de un componente constructivo de matriz cementicia; se evaluaron muestras de probetas elaboradas con el agregado.

## 6.2. Neutralización de contaminantes

A continuación, se presentan los resultados sobre los análisis químicos desarrollados para determinar evaluar los lixiviados de metales pesados y TBBPA.

### 6.2.1. Metales pesados

#### 6.2.1.1. Criterio de selección de muestras

En este ensayo, las muestras de agregado seleccionadas fueron las de tamaño 3 mm (FPR#3) debido a que, para el mismo ensayo aplicado a las muestras de FPR sin recubrir en el Capítulo 3 se decidió usar esta muestra debido que, por estar FPR#3 y FPR#8 en el mismo orden de magnitud, no será este un factor determinante en el lixiviado de metales pesados. Las muestras analizadas corresponden a la Serie 1 ya que estos ensayos forman parte de las primeras experiencias en laboratorio desarrolladas. Más allá de que luego, en la Serie 2, el CPF se reemplaza por MC, no se espera que el material interfiera en los resultados debido a que el MC cuenta con el suficiente porcentaje de materiales inertes minerales para mantener el ambiente básico capaz de neutralizar los metales pesados.

Para facilitar la lectura, en la Tabla 6.1 se incorporaron nuevamente los resultados obtenidos en el Capítulo 3 para la muestra FPR#3. El criterio de selección de metales analizados se explicó en el Capítulo 3.

#### 6.2.1.2. Metodología

La metodología de identificación de metales pesados en las muestras de APR coincide con las desarrollada en el Capítulo 3 para identificar metales pesados en las muestras de FPR. Asimismo, las condiciones de cada ensayo se detallan dentro de la Tabla 6.1.

#### 6.2.1.3. Resultados

Se muestran aquí los resultados correspondientes a la Serie 1 de muestras.

Tabla 6. 1: cuantificación de metales seleccionados en la extracción de FPRs y APRs<sup>1</sup>.

Entrada	Muestra	Condición	Cu	Pb	Zn	Cr	Sb
1	FPR#3	AR <sup>2</sup>	Nd <sup>3</sup>	(51,8 ± 0,4)	(155 ± 4)	nd	(741 ± 10)
2	FPR#3	EXT100 <sup>4</sup>	(0,195 ± 0,003)	< LOQ <sup>5</sup>	(0,176 ± 0,002)	< LOQ	(23,6 ± 0,5)
3	FPR#3@CPF	EXT100	(0,244 ± 0,001)	(1,17 ± 0,01)	(0,188 ± 0,003)	< LOQ	(6,0 ± 0,3)
4	FPR#3	TCLP <sup>6</sup>	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
5	FPR#3@CPF	TCLP	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ

<sup>1</sup> Determinación de metales desarrollada por análisis de absorción atómica con emisión de llama. Los valores informados corresponden al promedio de tres determinaciones con su desviación estándar. La concentración de metales lixiviados está expresada en mg<sub>metal</sub>/kg<sub>FPR</sub>.

<sup>2</sup> AR: digestión con agua regia (HCl(c): HNO<sub>3</sub>(c) 3:1) a 80 °C por 8 h.

<sup>3</sup> Nd: no determinado.

<sup>4</sup> EXT100: extracción usando 500 mL de agua destilada como solvente a 100 °C por 1 h sin agitación.

<sup>5</sup> Límite de cuantificación (LOQ; [Cu] = 0,061 mg/kg, [Pb] = 0,79 mg/kg, [Zn] = 0,038 mg/kg, [Cr] = 0,021 mg/kg, [Sb] = 4,5 mg/kg)

<sup>6</sup> TCLP: extracción mediante procedimiento de lixiviación característica de toxicidad (TCLP). Fluido #1 usado (4,5 mL de ácido acético glacial + 100 mL de agua milli-Q) como solvente, la extracción se desarrolló a 25 °C por 18 h con agitación.

Antes de comenzar con los resultados cabe aclarar que los metales pesados y peligrosos Hg y Cd no fueron detectados con esta técnica y que tanto el Cu como el Cr no pudieron cuantificarse en la extracción de agua regia debido a la presencia de partículas metálicas residuales del proceso de molienda de los

residuos plásticos. Estas dificultades generaron una alta variabilidad en la cuantificación de estos metales en la digestión con agua regia.

En la entrada 1 de la Tabla 6. 1, se muestran los valores de las concentraciones de metales para la digestión ácida de Pb, Zn y Sb en muestra FPR#3.

Para evaluar condiciones drásticas, se realizó la extracción con agua hirviendo durante 1 h en muestras de FPR#3 y APR FPR#3@CPF. Para ser más efectivo el lixiviado, el procedimiento se repitió tres veces (entradas 2 y 3). Respecto a la lixiviación de metales, este ensayo fue desarrollado en dos condiciones; para evaluar condiciones leves, se realizó el TCLP (entradas 4 y 5) [265].

La presencia de antimonio esperable fue comprobada mediante este ensayo. Como se explicó en el Capítulo 4, este metal pesado actúa como sinérgico junto a los retardantes de llama bromados (BFR) [4]. La cantidad lixiviada de este metal en la digestión de agua regia fue de 741 mg/kg (Tabla 6. 1, entrada 1). Cuando la extracción se realizó con agua destilada a 100 °C (Tabla 6. 1, entrada 2), la cantidad lixiviada de los metales pesados de la FPR fue menor. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el Sb fue el único metal pesado peligroso lixiviado en concentración significativa (23,6 mg /kg).

Las concentraciones de Sb lixiviadas bajo condiciones suaves, es decir con TCLP, resultaron todas bajo el límite de cuantificación (< 4,5 mg/kg). En condiciones drásticas de lixiviación, tanto Cu como Pb mostraron valores cercanos al límite de cuantificación (Tabla 6. 1, entradas 3 y 4), lo que hace pensar que es posible que la estabilización fuera efectiva y los valores observados correspondan a error experimental.

Respecto al Zn, la determinación con agua regia en muestras de FPR arrojó un valor de 155 mg/kg.

La extracción con agua hirviendo (EXT100) para el Zinc arrojó valores similares para la FPR y para las dos muestras de APR, por lo que se infiere que el comportamiento en este metal residuos plásticos con o sin tratamiento es similar. Por su parte, la extracción en condiciones suaves arrojó valores por debajo del límite de cuantificación para todos los metales analizados.

## 6.2.2. Neutralización de contaminantes orgánicos bromados

### 6.2.1.4. *Criterio de selección de las muestras*

De la misma manera que se estudió el lixiviado de TBBPA a partir de la FPR en el Capítulo 3; en este apartado se muestran los resultados obtenidos para el lixiviado del compuesto a partir de los diferentes APR elaborados con el objetivo de evaluar el rendimiento de estabilización de los contaminantes orgánicos con la cáscara de cemento y adición. Para esto, se estudiaron los componentes orgánicos de BFR en lixiviados de diferentes formulaciones de APR correspondientes a la Serie 1. Al igual que con los resultados sobre metales pesados, se espera que, al modificar el cemento, los resultados sean extrapolados.

Aquí entonces, incorporando para una mejor visualización de los resultados, las muestras de FPR#3 que ya fueron analizadas en el Capítulo 3, se analizan las muestras de APR correspondientes a la Serie 1 (Tabla 5.5) las que se fueron sometiendo a diferentes condiciones de ensayo. Muestras con Shell de cemento fueron seleccionadas para este análisis para comprobar si lo estudiado en bibliografía sobre el comportamiento del TBBPA dentro de medios básicos se cumplía en este caso. Luego se incorporaron muestras recubiertas con Shell de cemento y carbón activado para comprobar si el carbón activado funciona como estabilizante de la materia orgánica. También se incorporaron muestras con bentonita como alternativa al carbón activado con el objetivo de evaluar su capacidad de retener estos compuestos y finalmente se experimentó con la combinación de bentonita y carbón activado.

#### 6.2.1.5. Metodología

La metodología de los ensayos aquí desarrollados es coincidente con la desarrollada en el Capítulo 3 para el análisis de la muestra de FPR; Las concentraciones de compuesto orgánico para cada lixiviación fueron medidas por análisis GC-FID. Las cantidades de derivados de estireno indicadas aquí también se refieren a la concentración para la extracción de FPR. La identidad de los compuestos orgánicos se asignó mediante la técnica GC-MS. Todas las muestras fueron sometidas a diferentes condiciones. En las entradas 1 a 3 pueden verse los valores obtenidos para TCLP, entre las entradas 4 y 7 pueden verse los resultados para la condición EXT100 y en las entradas 8 a 12 se presentan los resultados para la EXT5. EXT100 y EXT50 consisten en extracciones de muestras de agua que contienen el agregado a temperatura de 100°C y 50°C respectivamente sin agitación. Finalmente, un análisis a las aguas de curado fue desarrollado en ACU. Las muestras de APR, una vez terminadas se dejan en agua para su curado durante 14 días a temperatura ambiente. Esta agua constituye entonces el agua de curado (ACU) y es la que en esta etapa se estudia con las mismas técnicas de las anteriores.

- Análisis de agua de poros del proceso de curado de APR y lixiviados de APR a diferentes temperaturas

Luego de elaborado el APR, se procedió de la siguiente manera con el fin de obtener aguas de curado para realizar la cuantificación del TBBPA lixiviado: inmersión de APR (elaborado a partir de 500 g de FPR) en 500 mL de agua mili-Q, durante 7 días a temperatura ambiente (25 °C), sin agitación. Se filtró y se continuó trabajando con la fase líquida. La solución se acidificó con ácido clorhídrico concentrado hasta pH = 2. La fase acuosa se extrajo con n-hexano y la fase orgánica recogida se secó con sulfato de sodio y el disolvente se evaporó al vacío. Se agregaron los estándares a la fase orgánica y se disolvió en acetato de etilo (10 mL); el compuesto orgánico (TBBPA y derivados del estireno) fue cuantificado por GC-FID utilizando el método del estándar interno como se describe en la sección siguiente.

Por otra parte, se realizaron lixiviados a altas temperaturas sobre las muestras de FPR y APR, para poder analizar el proceso de estabilización en condiciones más drásticas, para lo cual se realizó el siguiente procedimiento: se colocó una muestra de RPA que contenía 100 g de FPR en el recipiente de extracción con 300 mL de agua. Se calentó y la temperatura de extracción (50 o 100 °C) se mantuvo durante 1 h. Luego se dejó enfriar y se filtró. Este procedimiento se repitió dos veces más (tres extracciones). Finalmente, el sólido se filtró y se colectó el sobrenadante de las tres fracciones. La solución se acidificó con ácido clorhídrico concentrado hasta pH = 2. Las muestras fueron tratadas de la misma manera que las aguas curadas explicadas anteriormente.

#### 6.2.1.6. Resultados

Los resultados y condiciones de los ensayos se exponen en la Tabla 6.2.

Tabla 6. 2: extracción de componentes orgánicos en muestras de FPR y diferentes APR.

Entrada	Muestra	Condición	TBBPA <sup>1</sup>	TBBPA <sup>2</sup>	Derivados de estireno <sup>3</sup>
1	FPR#3	TCLP <sup>4</sup>	<LOD	<LOD <sup>5</sup>	-
2	FPR#3@ CPF	TCLP	<LOD	<LOQ	-
3	FPR#3@ CPF:CA	TCLP	<LOD	<LOD	-
4	FPR#3	EXT100 <sup>6</sup>	(23,0 ± 0,1)	(23,0 ± 0,1)	1,00
5	FPR#3@ CPF	EXT100	(245 ± 7)	(245 ± 7)	0,70
6	FPR#3@ CPF:CA	EXT100	(19,4 ± 0,8)	(19,4 ± 0,8)	
7	FPR#3@ CPF: BT	EXT100	(176 ± 3)	(176 ± 3)	0,65
8	FPR#3	EXT50 <sup>7</sup>	(4,4 ± 0,1)	(4,4 ± 0,1)	1,00

9	FPR#3@CPF	EXT50	(17,7 ± 0,7)	(17,7 ± 0,7)	
10	FPR#3@CPF:CA	EXT50	<LOQ	<LOQ	
11	FPR#3@CPF:BT	EXT50	(10,6 ± 0,1)	(10,6 ± 0,1)	
12	FPR#3@CPF:BT:CA	EXT50	<LOQ	<LOQ	
13	FPR#3@CPF	ACU <sup>8</sup>	(6,3 ± 0,2)	(1,26 ± 0,04)	1,00
14	FPR#3@CPF:CA	ACU	<LOD	<LOD	
15	FPR#3@CPF:BT	ACU	(5,2 ± 0,2)	(1,05 ± 0,04)	1,50
16	FPR#3@CPF:BT:CA	ACU	<LOD	<LOD	

<sup>1</sup>Concentración de TBBPA (x102 mg/L) en solución concentrada, volumen total de 10 mL

<sup>2</sup>TBBPA lixiviado de las muestras en mg<sub>TBBPA</sub>/kg<sub>FPR</sub> (x10<sup>1</sup> mg/kg).

<sup>3</sup>Concentración relativa a entradas de FPR 5, 10 y FPR@CPF, 16.

<sup>4</sup>TCLP: extracción con muestra que contiene 100 g de FPR, usando el procedimiento de lixiviado de toxicidad característica (TCLP). Flujo #1 usado: 4,5 mL de ácido acético glacial + 100 mL de agua milli-Q como solvente. Extracción llevada a cabo a temperatura de 25 °C. con agitación realizada 3 veces [186].

<sup>5</sup>Límite de detección (LOD = 84 mg/L) y límite de cuantificación (LOQ = 281 mg/L).

<sup>6</sup>EXT100: extracción con muestra que contiene 100 g de FPR, con 300 mL de agua milli-Q como solvente a 100 °C por 1 h, sin agitación, 3 veces.

<sup>7</sup>EXT50: extracción de muestra que contiene 100 g de FPR, con 300 mL de agua milli-Q como solvente a 50 °C por 1 h, sin agitación, 3 veces.

<sup>8</sup>ACU: Agua de curado de los APR. Inmersión de los APR que contienen 500 g de FPR en 500 mL de agua milli-Q por 7 días a una temperatura de 25 °C, sin agitación.

La Tabla 6.2 muestra las concentraciones de TBBPA para cada lixiviado medido por cromatografía de gases y en la Figura 6. 1, muestran las curvas obtenidas para cada muestra luego de la EXT50.

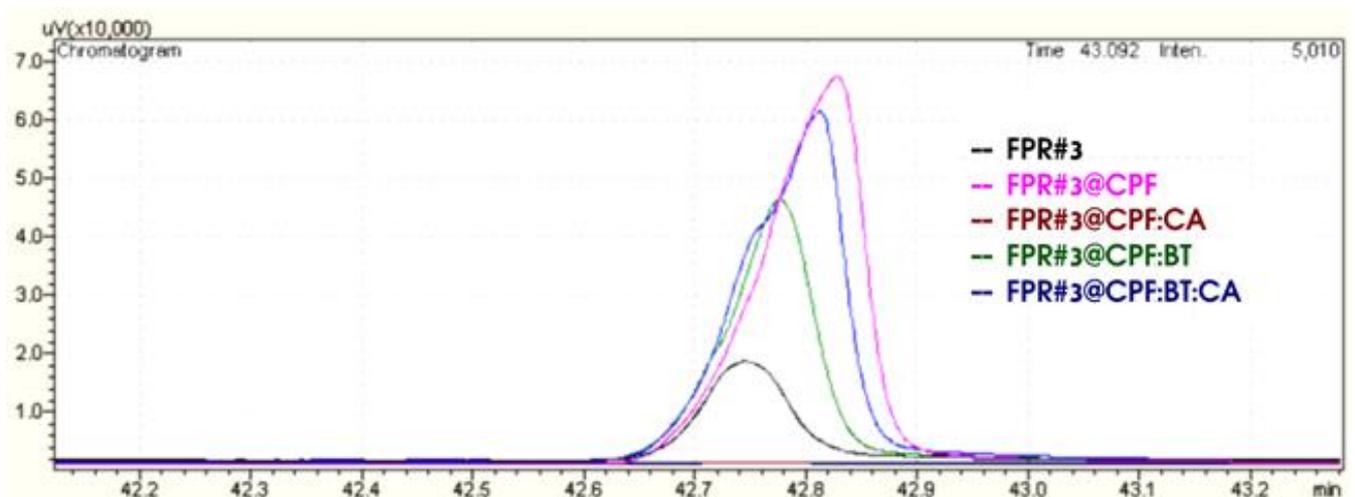


Figura 6. 1: fracción de cromatograma de 42,2 a 43,2 min. Se observa la variación de la intensidad de la señal del TBBPA en función de las diferentes mezclas.

Las entradas 1-3 de la Tabla 6. 2, muestran la extracción de los contaminantes orgánicos, empleando el método TCLP. El método consiste en una extracción en condiciones suaves (25 °C y pH = 5).

Para el método TCLP, el lixiviado obtenido mostró una concentración muy baja de TBBPA (por debajo del límite de cuantificación) tanto en FPR como en los APR con cemento y cemento+carbón activado.

En las entradas correspondientes a las extracciones en condiciones duras (EXT100 y EXT50) puede verse que cuando la extracción se llevó a cabo sobre FPR puro a 100 °C, se lixiviaron 230 mg/kg de TBBPA

(entrada 4). Cuando la misma experimentación se desarrolló a 50 °C, lixiviaron 44 mg/kg de TBBPA (entrada 8).

En las entradas 5 y 9, correspondiente EXT100 y EXT 50 respectivamente de FPR#3@CPF, la lixiviación de TBBPA fue estimulada por esta capa de cemento y se aumentó la concentración de TBBPA en un orden de magnitud superior al de los lixiviados de FPR. Esto permite comprobar lo estudiado en bibliografía sobre el contacto del TBBPA con la cáscara de cemento, una base fuerte [244], lo que produce una reacción inmediata del TBBPA formando una especie anionica y aumentando así su lixiviación en la fase acuosa.

Frente a esto, durante la investigación se propuso la búsqueda y análisis de ciertas estrategias para lograr la estabilización completa de este compuesto fenólico en matriz cementicia mediante la incorporación de adiciones [239][7]. Como vimos en la Tabla 5.5, se estudiaron diferentes APRs, con incorporación de carbón con una adición inerte tal como activado, bentonita y combinación de ambos. (FPR#3@CPF:CA, FPR@CPF:BT y FPR@CPF:BT:CA).

Cuando se utilizó bentonita como adición en la cáscara de los APR (FPR#3@CPF:BT), el lixiviado de TBBPA disminuyó en relación con FPR#3@CPF (entradas 9 y 11) pero no significativamente.

Por el contrario, cuando se empleó carbón activado como adición, el valor del lixiviado TBBPA de fue considerablemente menor quedando por debajo del límite de cuantificación (LOQ). Por lo tanto, el carbón activado permitió la estabilización deseada más allá del TBBPA se haya encontrado en estado aniónico debido a la presencia del cemento.

Asimismo, cuando se combinaron carbón activado y bentonita (entrada 12) el lixiviado se mantuvo también por debajo de LOQ. Esto, frente al resultado de la entrada 11 que se mencionó anteriormente, permite inferir que el aditivo que logra la estabilización es carbón activado y no, la bentonita.

En relación a las condiciones EXT100. Llamativamente, la concentración de TBBPA lixiviado bajo la condición EXT100 de FPR#3@CPF:AC fue muy cercana a la concentración extraída de FPR. Aquí las condiciones duras fueron determinantes. Con el agua hirviendo, la generación de burbujas produjo el rompimiento de cascara de cemento+aditivo (Figura 6. 2), exponiendo la superficie del plástico al medio de extracción y, por lo tanto, promoviendo la lixiviación de TBBPA a través de las grietas generadas.

Frente a estos resultados, las muestras FPR#3@CPF:BT:CA no fueron analizadas bajo la condición dura debido a que se logró comprobar lo necesario.

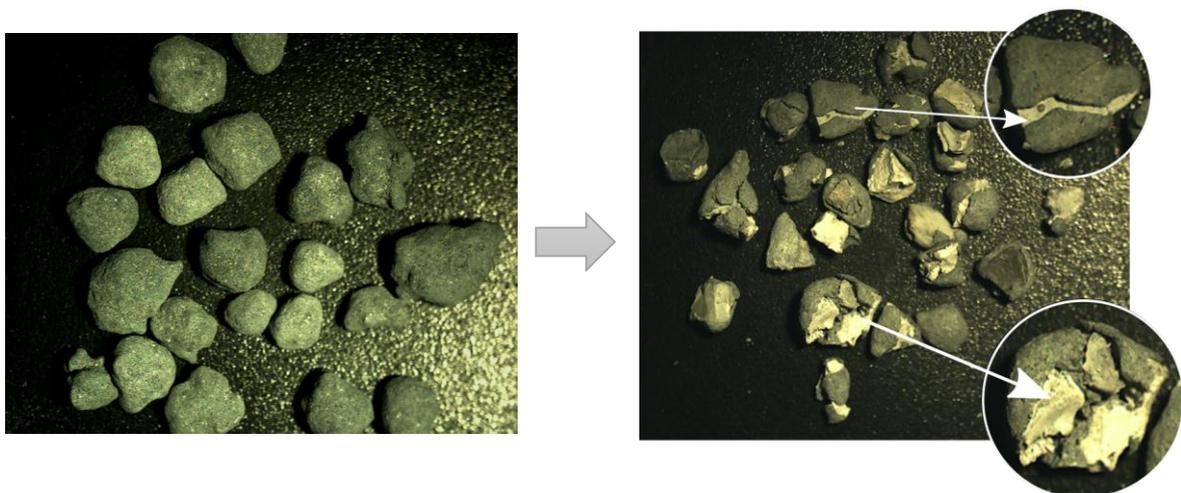


Figura 6. 2: APR de tipo FPR#3@CPF:AC sometido a una condición de EXT50 y EXT100.

Esto podría explicar por qué la cantidad lixiviada de TBBPA en la condición EXT100 de FPR@CPF:CA (194 mg/kg) fue similar a las partículas FPR sin recubrir (230 mg/kg).

Respecto a los derivados del estireno, en el cromatograma de la Figura 6. 3 se muestra la ausencia total de estos compuestos orgánicos procedentes de la degradación polimérica en los lixiviados de FPR#3@CPF: CA y en comparación con FPR#3. Esto nos indica que la partícula plástica se encuentra correctamente aislada por el *Shell*.

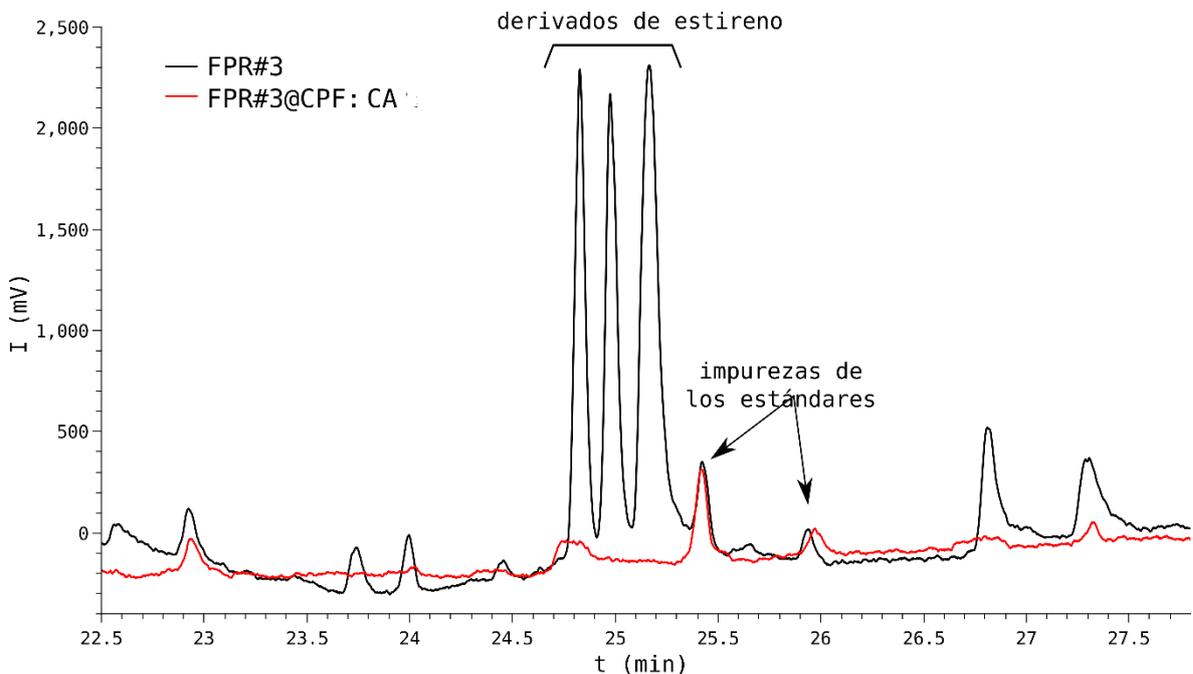


Figura 6. 3: fracción de cromatograma de extracción de FPR y FPR@CPF:CA, zona con derivados de estireno.

Finalmente, respecto a las aguas de curado (entradas 13 a 16), la concentración de TBBPA en el agua de curado de FPR#3@CPF fue la más alta, seguida por FPR#3@CPF:BT. Las muestras con CA en la composición arrojaron valores por debajo de límite de detección (LOD).

Estos resultados nos indican que durante los futuros procesos de fabricación y manejo de los APR los áridos con carbón activado constituyen un componente seguro desde el punto de vista de la lixiviación de compuestos orgánicos peligrosos.

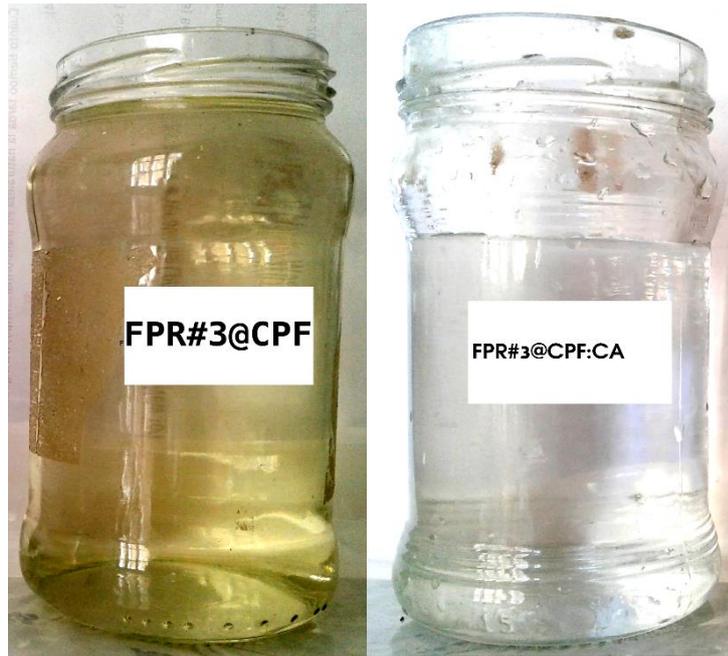


Figura 6. 4: aguas de curado de muestras sin carbón activado y con carbón activado respectivamente.

En la Figura 6.4, se presentan muestras de agua de poros para el curado de muestras del tipo FPR#3@CPF y FPR#3@CPF:CA. Se observó que después de un mes de exposición a la luz y la temperatura ambiente, la primera tomó un color amarillento. Luego de las comprobaciones a través del análisis químico de estas aguas, sabemos que es posible atribuir este color a la fotodegradación del TBBPA presente en el agua [230]. En la segunda imagen, vemos como el agua de curado luego de un mes no mostró coloración.

Como se explicó al inicio del Capítulo, el factor determinante para seleccionar la mezcla fue el de la capacidad de la misma de retener contaminantes, tanto metálicos como orgánicos. Una vez comprobada la eficacia del cemento como estabilizador de metales pesados y del carbón activado como aditivo neutralizador de TBBPA, se continuó la experimentación en búsqueda del criterio número dos; viabilidad técnica y económica. En este sentido se desarrollaron una gran masa de muestras en las que se fue variando su tipo/marca de carbón activado y su porcentaje de adición. También se incorporaron muestras con carbón vegetal (CV) en reemplazo de carbón activado por el mismo motivo de viabilidad técnica y económica; de funcionar la adición como material neutralizador de BFR, sería el CV un material mucho más económico y accesible. La descripción de cada una de las marcas aquí utilizadas puede encontrarse en el apartado 5.2.4 Adiciones, del Capítulo 5. Este análisis permite seleccionar de entre los carbones activados disponibles comercialmente cual es que mejor se adapta a los requerimientos buscados y, modificando el porcentaje de adición en relación al cemento se logró obtener la mezcla más económica y efectiva posible.

En la tabla 6.3 entonces, se desarrollan estas muestras. Las mismas corresponden a la Serie 2 desarrollada en el Capítulo 5 ya que cuenta con cemento de albañilería (MC) en reemplazo del CPF. Siguiendo con el mismo criterio, los resultados arrojados cuando se usó CPF resultan extrapolables ya que la composición del MC no interfiere en el desempeño del carbón activado.

Tabla 6. 3: extracción de componentes orgánicos de diferentes APR<sup>1</sup>.

Entrada	Muestra	[TBBPA] <sup>2</sup>	TBBPA <sup>3</sup>
1	FPR#3 @ MC <sup>1</sup>	(105 ± 2)	(41,8 ± 0,7) <sup>1</sup>
2	FPR#3 @ MC: CA/061-1	≤LOD <sup>5</sup>	≤LOD
3	FPR#3 @ MC: CA/061 -2	≤LOD	≤LOD
4	FPR#3 @ MC: CA/061-3	≤LOD	≤LOD
5	FPR#3 @ MC: CA/061 -4	≤LOD	≤LOD
6	FPR#3 @ MC: CA/CU - 1	≤LOD	≤LOD
7	FPR#3 @ MC: CA/CU - 2	≤LOD	≤LOD
8	FPR#3 @ MC: CA/CU- 3	≤LOD	≤LOD
9	FPR#3 @ MC: CA/CU - 4	≤LOD	≤LOD
10	FPR#3 @MC: CA/MMF-1	≤LOD	≤LOD
11	FPR#3 @MC: CA/MMF-2	≤LOD	≤LOD
12	FPR#3 @MC: CA/MMF-3	≤LOD	≤LOD
13	FPR#3 @MC: CA/MMF-4	≤LOD	≤LOD
14	FPR#3@ MC :CA/CB-1	≤LOD	≤LOD
15	FPR#3@ MC :CA/CB-2	≤LOD	≤LOD
16	FPR#3@ MC :CA/CB-3	≤LOD	≤LOD
17	FPR#3@ MC :CA/CB-4	≤LOD	≤LOD
18	FPR#3@ MC :CA/MK-1	≤LOD	≤LOD
19	FPR#3@ MC :CA/MK-2	≤LOD	≤LOD
20	FPR#3@ MC :CA/MK-3	≤LOD	≤LOD
21	FPR#3@ MC :CA/MK-4	≤LOD	≤LOD
22	FPR#3 @ MC: CV-1	(100,0±0,03)	(40,0±0,1)
23	FPR#3@ MC: CV-2	(85,0±0,5)	(34,0±0,2)
24	FPR#3 @ MC: CV-3	(63,5±0,5)	(25,4±0,2)
25	FPR#3@ MC: CV-4	(58,5±0,5)	(23,3±0,2)
26	FPR#3 @ MC: CV-20	≤LOQ <sup>4</sup>	≤LOQ
27	FPR#3@ MC: CV-30	≤LOD	≤LOD

<sup>1</sup>Aguas de curado de APRs. Inmersión de APR que contiene 250 g de FPR en 500 ml de agua MiliQ por 14 días a 25 °C sin agitación.  
<sup>2</sup> Concentración de TBBPA (x10<sup>1</sup> mg x L) en solución concentrada (volumen total de 10 ml).  
<sup>3</sup>Lixiviado de TBBPA de muestras en mg<sub>TBBPA</sub>/kg<sub>FPR</sub> (mg/kg).  
<sup>4</sup> LOD: 84mg/L – LOQ: 279 mg/L.

La Tabla 6.3 muestra las concentraciones de componentes orgánicos para cada lixiviado de cada APR determinado mediante CG-FID. De este análisis podemos observar que todos los carbones activados ensayados, en cada una de sus respectivas dosificaciones (1,1 a 4,3%) generan lixiviados por debajo del límite de detección para TBBPA. Por lo que, un porcentaje mínimo de CA (1,1%) es suficiente para lograr el objetivo. Este comportamiento responde al alto número de iodo y superficie específica determinada para estos carbones. Un carbón activado con una superficie específica de 896 m<sup>2</sup>/g, constituye uno de los adsorbentes más efectivos para la eliminación de compuestos bromados en soluciones acuosas según Zhou y col. [245]. Esto resultó acorde a los resultados obtenidos en este análisis, donde los carbones activados con superficies específicas de entre 500 a 800 m<sup>2</sup>/g alcanzaron una alta eficiencia en lixiviación de TBBPA en aguas de poros. Si bien el valor no es el mismo obtenido por Zhou y col. el arrojado en el análisis resultó suficiente. No es objetivo en esta tesis optimizar un carbón activado para aplicarlo en la composición, lo que se persigue es trabajar con materiales comercialmente disponibles ya que, como dijimos anteriormente se busca la viabilidad económica y técnica.

Finalmente se comprobó que el carbón vegetal -no activado- no presenta la misma eficiencia que los anteriores carbones, se requieren altos porcentajes de adición para lograr la neutralización del componente orgánico. Este comportamiento se relaciona directamente a su menor número de iodo y superficie específica y también al hecho de que dicho carbón no pasó por un proceso de activación.

Seguidamente se muestran imágenes que fueron tomadas durante el procedimiento de los ensayos que permiten observar de manera cualitativa la presencia en mayor y menor magnitud de lixiviado de TBBPA en las diferentes aguas de curado.



*Figura 6. 7: agua de curado FPR#3 @ MC: CA/061-1*



*Figura 6. 6: agua de curado FPR#3 @ MC: CA/CU - 1*



*Figura 6. 5: agua de curado FPR#3 @MC: CA/MMF-1*



*Figura 6. 8: agua de curado FPR#3 @ MC*



*Figura 6. 9: agua de curado FPR#3@MC:CV-1*



*Figura 6. 10: agua de curado FPR#3@ MC: CV-2*



Figura 6. 11: aguas de curado FPR#3; FPR#3@MC; FPR#3@MC:CA/CU-1; FPR#3@MC:CA/CU-4



Figura 6. 12: aguas de curado FPR#3@MC:CV- 4; 20 Y 30

En las fotografías de las figuras 6.5, 6.6, y 6.7 se observa una mayor limpieza del agua en comparación con las figuras 6.8, 6.9 y 6.10 en las que prevalece en color amarillento. En el primer grupo de fotografías, la composición de los APR tiene carbón activado, mientras que, en el segundo grupo, en 6.8 se ha usado sólo cemento y en 6.9 y 6.10 se ha usado carbón vegetal. Estas imágenes presentan concordancia con los resultados cuantitativos arrojados por el análisis químico que concluye en que el carbón activado estabiliza eficazmente el TBBPA evitando que lixivie al medio acuoso.

En la fotografía de la Figura 6. 11, podemos ver la diferencia entre diferentes formulaciones de manera cualitativa y comparativa; vemos que sólo el APR FPR#3@MC:CA/CU-1 estabiliza correctamente el TBBPA, incluso con el menor porcentaje de dosificación.

En la Figura 6. 12, podemos ver aguas de curado de APR con carbón vegetal, en donde se evidencia que con mayores porcentajes de adición de CV, recién se logra estabilizar el TBBPA.

### 6.3. Determinación de características físicas

Concluidos los ensayos químicos que permitieron comprobar que la técnica de *core-shell* inhibe la lixiviación de potenciales contaminantes, resta conocer las propiedades físicas del agregado para saber si podrá ser usado como tal en morteros u hormigones. Para esto se realizaron los siguientes ensayos:

#### 6.3.1. Descriptores de forma, tamaño y densidad aparente de los agregados

##### 6.3.1.7. Criterios de selección de las muestras

Para este ensayo, la selección de muestras está relacionada principalmente a su morfología y tamaño. Se busca conocer cómo, tanto en FPR#3 y FPR#8 el material de encapsado va modificando parámetros como la circularidad y redondez o relación de aspecto. Por estos motivos, se usaron las muestras de la Serie 1, en donde el tipo de cemento no interfiere, pero sí su cantidad, el tamaño de partícula y la incorporación de carbón activado en la mezcla como material adicional. Se incorporaron también, muestras correspondientes a la Serie 1 de FPR#3 que corresponden a una etapa exploratoria para analizar la efectividad en el número de capas de la cáscara que cubre la superficie polimérica. Se espera que los resultados de estas muestras sean extrapolables al tamaño 8 mm. Los resultados sobre densidad aparente de cada una de las muestras, se analizan también para evaluar su modificación en relación a la incorporación de material.

##### 6.3.1.8. Metodología

La metodología desarrollada para el análisis de forma, tamaño y densidad aparente coincide con el aplicado en el Capítulo 3, Sección 3.2.1 en donde se caracteriza a las muestras de FPR. De todas formas, en la Tabla 6.4 de esta sección se han incorporado los resultados de la sección 3.2.1 para la mejor visualización de la evolución de las propiedades respecto a la modificación de la partícula.

##### 6.3.1.9. Resultados

Los descriptores de tamaño y forma, relación de aspecto y densidad aparente se muestran a continuación, en la Tabla 6.4.

Tabla 6. 4: Caracterización de los APRs<sup>1</sup>.

Entrada	Muestra	Área (mm <sup>2</sup> )	RA <sup>3</sup>	Redondez	Circularidad	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> ) <sup>4</sup>
1	FPR#3	(8 ± 4)	(1,6 ± 0,4)	(0,6 ± 0,2)	(0,5 ± 0,2)	0,54
2	FPR#8	(36 ± 2)	(1,9 ± 0,7)	(0,6 ± 0,2)	(0,6 ± 0,1)	0,57
3	FPR#3@ CPF <sup>1</sup>	(7 ± 3)	(1,6 ± 0,4)	(0,7 ± 0,2)	(0,8 ± 0,1)	Nd <sup>5</sup>
4	FPR#3@ CPF <sup>2</sup>	(8 ± 3)	(1,6 ± 0,4)	(0,7 ± 0,1)	(0,7 ± 0,1)	Nd
5	FPR#3@CPF	(7 ± 3)	(1,5 ± 0,5)	(0,7 ± 0,2)	(0,8 ± 0,1)	0,84
6	FPR#8@CPF	(47 ± 2)	(1,7 ± 0,7)	(0,6 ± 0,2)	(0,6 ± 0,2)	0,84
7	FPR#3@CPF:CA	(10 ± 4)	(1,5 ± 0,5)	(0,7 ± 0,2)	(0,8 ± 0,1)	0,80
8	FPR#8@CPF:CA	(42 ± 2)	(1,6 ± 0,6)	(0,7 ± 0,2)	(0,7 ± 0,1)	0,81

Los descriptores de tamaño y forma fueron determinados utilizando fotos digitales y su correspondiente análisis con el software ImageJ 1.49i. Con dos excepciones, todas las muestras fueron preparadas con 3 capas.

<sup>1</sup> Estas muestras presentan 1 capa de *Shell*.

<sup>2</sup> Estas muestras presentan 2 capas de *Shell*.

<sup>3</sup> RA: relación de aspecto.

<sup>4</sup>  $\rho$ : densidad aparente.

<sup>5</sup> No determinado

Respecto a FPR#3, podemos ver cómo al recubrir la partícula con cemento, el área no se ve modificada, pero al incorporar a la mezcla, carbón activado ya el tamaño de la partícula aumenta de forma significativa ( $8 \pm 4$  a  $10 \pm 3$  mm<sup>2</sup>).

En las entradas 3 y 4 se muestran los resultados aplicando el material en 1 y 2 capas de respectivamente. Estas muestras formaron parte de una etapa exploratoria inicial cuyas muestras corresponden a la Serie 1 y consisten en la partícula de FPR#3 encapsada con la misma cantidad de material que en los demás casos, pero el Shell se aplicó en una y dos veces, respectivamente. FPR#3@CPF con una capa, mostraron los mismos descriptores de forma, relación de aspecto y valores de esfericidad que FPR#3. Cuando se aumentó el número de capas (entradas 4 a 5), los descriptores de forma cambiaron a partículas más circulares. Además, el valor de la relación de aspecto disminuyó de 1.6 a 1.5 de cero a tres capas, lo que indica que el crecimiento de partículas fue más importante para el eje menor. Por lo tanto, la mejor metodología para obtener FPR#3@CPF aplicando el *Shell* en 3 capas.

Para FPR#8 los parámetros redondez y circularidad, aumentan en cuanto se va adicionando más material al Shell (entradas 2, 6 y 8) al mismo tiempo, la relación de aspecto va disminuyendo a medida que se incorpora más material. Esto quiere decir que también la partícula FPR#8 se va acercando más a la circularidad a medida que se va encapsando.

En ambos tamaños, el cubrir la partícula con aditivos en movimientos envolventes hace que la morfología puntiaguda de las partículas de RAEE pierda su forma y se asemeje más a la de un agregado natural.

El área de FPR#8 sufre una leve disminución al incorporar CA a la mezcla (entrada 8). Esto quizá tenga relación a como fue cubriendo la partícula el Shell, pueden haberse generado acumulaciones de material en ciertas partes de las partículas de manera uniforme que interfieren en los tamaños y finalmente, en la homogeneidad del material.

Entre los tamaños 3 y 8mm, los resultados obtenidos en parámetros como la redondez y la circularidad de las aumentan o bien, se mantienen al estar cubiertas con el encapsado en todas las muestras. Particularmente, la circularidad aumenta más cuando las partículas son de 3 mm, como es el caso de FPR#3@CPF. Por otro lado, la relación de aspecto disminuye si se comparan las partículas de FPR 3 y 8 mm. Este hecho indica que la carga del material del *shell* ocurre de manera más eficiente cuando partícula presenta menor área y menor relación de aspecto, obteniendo así partículas con formas más esféricas que las que le dieron origen.

Respecto a la densidad aparente, se observa una diferencia importante entre las muestras de FPR y las encapsadas con cemento, la densidad se incrementa en un poco menos que el doble. Para las muestras de FPR#8 el valor de la densidad aparente pasa de  $0,57$  g/cm<sup>3</sup> a  $0,84$  g/cm<sup>3</sup> para FPR #8 y FPR#8@CPF respectivamente; cuando se incorpora CA, densidad aparente disminuye levemente pero el valor se mantiene mayor que en FPR.

Algo similar se observa para las muestras de RAEE de 3 mm, donde la densidad aparente aumenta desde  $0,54$  g/cm<sup>3</sup> a  $0,84$  g/cm<sup>3</sup> para FPR#3 y FPR#3@CPF respectivamente y luego disminuye a  $0,80$  g/cm<sup>3</sup> en FPR#3@CPF:CA.

En comparación al agregado fino natural; que posee un valor de densidad aparente de  $1,48$  g/cm<sup>3</sup>, los APR poseen una densidad aparente menor, lo que implica *a priori* que la conductividad térmica de un mortero elaborado con APR será menor a la de un mortero elaborado con un agregado natural como la arena gruesa [181].

### 6.3.2. Granulometría y módulo de finura

#### 6.3.2.10. Criterios de selección de muestras

Para determinar granulometría y módulo de finura se trabajó con las mismas muestras que se analizaron para determinar tamaño y forma, pero sólo en tamaño 3 mm. Esta elección corresponde a lo obtenido en el Capítulo 3; la curva granulométrica de la muestra es la que más semejanza tuvo con el agregado natural al igual que su módulo de finura. También los factores de tamaño y forma como relación de aspecto, redondez y circularidad de la muestra FPR#3 arrojaron mejores resultados cercanos a los de la arena y, por otro lado; el reglamento CIRSOC 501, determina para los morteros que el tamaño máximo de las partículas de arena debe ser de 3 mm. Por lo que, en este sentido las partículas de tamaño 8 mm, quedarían excluidas.

#### 6.3.2.11. Metodología

La metodología es la misma aplicada para analizar la granulometría de FPR#3 y FPR#8 en el Capítulo 3 en donde se detalla el método con mayor precisión.

#### 6.3.2.12. Resultados

En la Figura 6. 13 se muestran las curvas granulométricas para las muestras estudiadas.

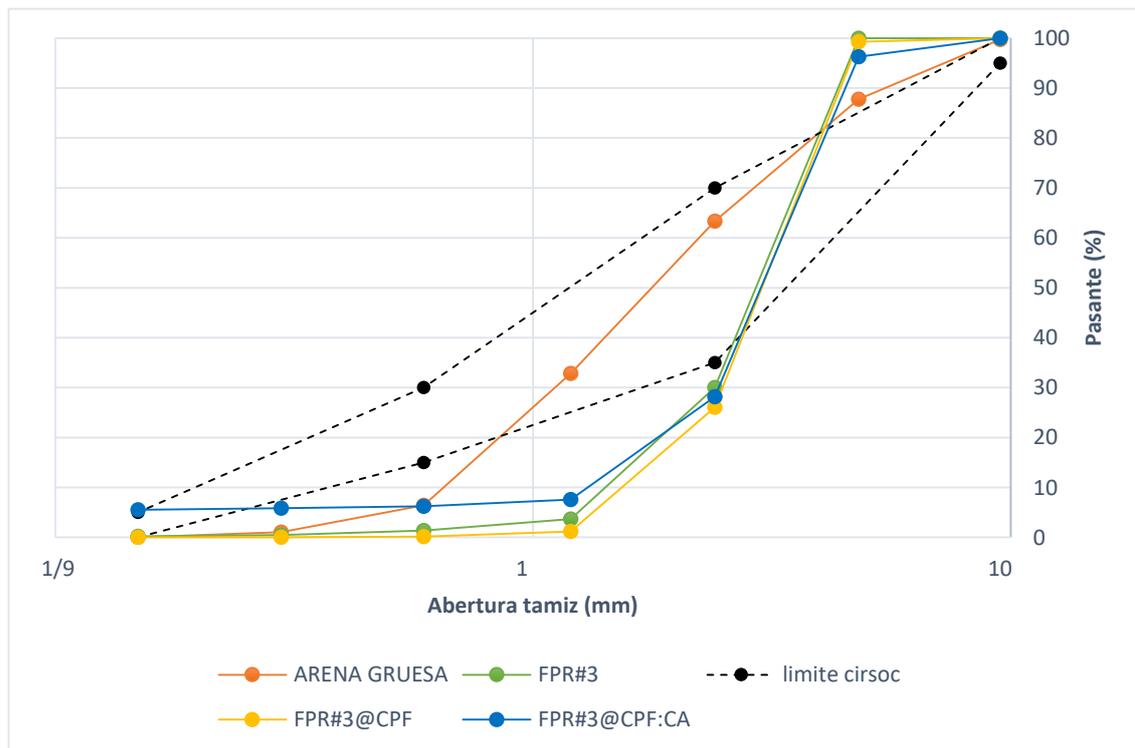


Figura 6. 13: distribución por tamaño de partículas de APRs, FPR y arena gruesa en relación a los límites CIRSOC.

Como se evidencia en la Figura 6. 13, la arena gruesa del río constituye un agregado continuo, y su curva queda comprendida entre las curvas de granulometría límite del Reglamento CIRSOC 201(2005). Los FPR#3 y los APR, FPR#3@CPF y FPR#3@CPF:CA, por el contrario, presentan una granulometría discontinua, con mayor cantidad de partículas gruesas y por fuera de los límites en algunos sectores. Esta

característica se atribuye al método de trituración mediante el cual se obtuvieron los residuos. Una distribución del tamaño de partícula más cercana a la norma se puede lograr mezclando dos o más agregados [212]. Como se puede ver en la Figura 6.13, el APR de FPR#3@CPF forma una curva que se dibuja lejos de estos límites. Frente a esto, en la figura 6.14 se muestra una figura de ajuste de la curva granulométrica que corresponde a un trabajo publicado por el grupo de investigación que acompaña esta tesis y en que la tesista ha participado [246]. En el mismo se propone un ajuste granulométrico del agregado incorporando arena de río para que este pueda ser incorporado en morteros de cemento. Aquí, FPR@CPF se mezcló con arena fina de río en una proporción de 1:5 y así, la granulometría se formó casi entre los límites. CIRSOC 201 [184].

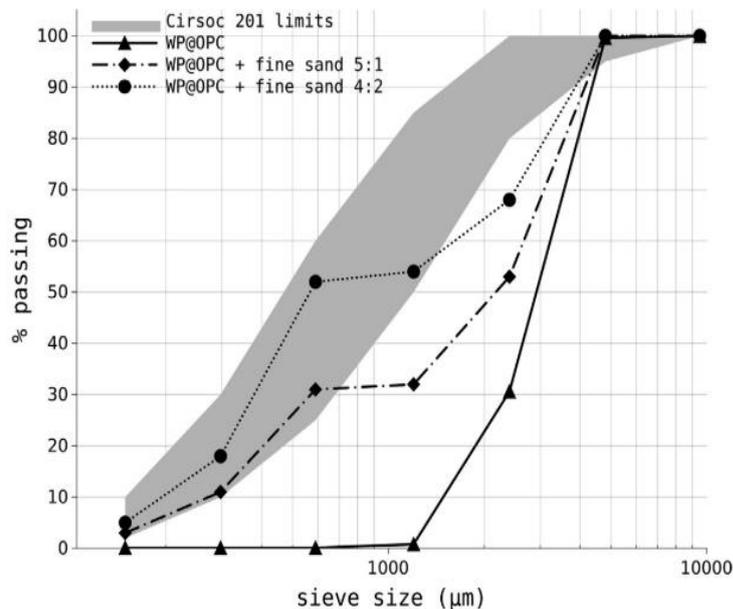


Figura 6. 14: Distribución por tamaño de partículas de APR con arena fina de río correspondiente a un trabajo publicado por el grupo.

Los Módulos de finura (MF) correspondientes a cada agregado fueron determinados bajo la Norma IRAM 1505 [183] y se presentan en la Tabla 6.5.

Tabla 6. 5: módulos de finura para las muestras.

Entrada	Muestra	MF
1	FPR#3	4,70
2	FPR#8	5,47
3	FPR#3@CPF	4,69
5	FPR#3@CPF:CA	4,72
7	FPR#8@CPF	5,76
9	FPR#8@CPF:CA	5,73
10	ARENA	3,09

En todos los casos el valor del módulo de finura, resultó mayor al valor del agregado natural, esto es esperable ya que el tamaño de las partículas es mayor en todos los casos. Sin embargo, puede comprobarse que los módulos de finura APR de tamaño 3 mm son más cercanos a los de la arena, tanto en su versión con cemento y cemento+carbón activado.

#### 6.4. Propiedades los APR en morteros cementicios

Con los diferentes APR descritos en el capítulo anterior, se elaboraron probetas de mortero cementicio con el objetivo de evaluar propiedades aislantes, comportamientos mecánicos y de transporte de los mismos como agregado en morteros. Para ello se elaboraron probetas prismáticas de 160 mm de longitud, 40 mm de altura y 40 mm de ancho con las diferentes formulaciones de APR presentadas en el Capítulo 5- Sección 5.4.1, las cuales fueron sometidas a ensayos de compresión, flexión, capacidad y velocidad de succión capilar y conductividad térmica.

Una vez preparadas, se mantuvieron en el molde durante 24 horas, cubiertas con film de polietileno para evitar pérdida de humedad. A las 24 horas se desmoldaron e introdujeron en una pileta de curado, hasta la edad de ensayo.

Los diseños de mezcla desarrollados se exponen en la Tabla 6.6. Las probetas fueron elaboradas con APR y FPR de 3 y 8 mm como agregados en cemento portland tipo CPF-40. La relación A/C no fue determinada, ya que se observó mucha variabilidad en la demanda de agua entre las muestras debido a la diferente condición de humectabilidad de AR, FPR y APR. La cantidad de agua usada para cada pasta se aproximó buscando alcanzar una trabajabilidad aceptable de la muestra para el colado de las probetas. En relación a lo obtenido en el análisis granulométrico, se incorporó una serie de probetas con incorporación de arena de río como material de ajuste granulométrico. Esta probeta será medida a compresión para evaluar si este factor permite un mejor desempeño del componente o no tiene un impacto significativo.

También y sólo para establecer comparaciones con los APR y con lo obtenido por otros autores, se desarrollaron probetas con FPR#3 y FPR#8 incorporadas a la mezcla sin encapsular. Más allá de que el material propuesto sea la partícula recubierta, su incorporación podría aportar datos interesantes al análisis.

En la Serie 2, puede verse que, frente a lo obtenido en el 6.2, en donde se pudo comprobar mediante análisis químicos que el material de encapsado debe ser una combinación de cemento y carbón activado (no vegetal), que el porcentaje mínimo efectivo para retener contaminantes es de 1,1% y que no hay diferencias significativas entre las diferentes marcas de carbón activado se han incorporado muestras con las diferentes marcas propuestas de CA. Sin embargo, la marca Merck fue extraída de las muestras por tratarse el mismo de un carbón activado específico para análisis de laboratorio, de mayor costo y que no se adaptaría a la producción de componentes a gran escala y de bajo costo.

Tabla 6. 6: diseños de mezcla incorporados en esta investigación.

Entrada <sup>1</sup>	Agregado/ masa (g)	CPF	AG/CPF 2	Agua (MI)	Masa (g)	Cemento Total (%) <sup>3</sup>		
<b>Serie 1</b>								
1	Arena gruesa	379	50	1:6 <sup>4</sup>	36	429	50	12
2	FPR#3	131	50	1:6	26	181	50	28
3	FPR#3@CPF	161	50	1:6	29	211	110	52
4	FPR#3@CPF:CA	154	50	1:6	25	204	91	45
5	Arena gruesa	379	75	1:4 <sup>5</sup>	45	454	75	17
6	FPR#3	131	75	1:4	35	206	75	36
7	FPR#3@CPF	161	75	1:4	39	232	135	57
8	FPR#3@CPF:CA	154	75	1:4	43	229	116	51
9	FPR#3@CPF:AR <sup>6</sup>	134+64	50	1:1:5	36	248	100	40
<b>Serie 2</b>								
10	FPR#3	369	52	1:6	60	421	52	14
11	FPR#8	300	70	1:6	60	370	70	23
12	FPR#3@MC	300	50	1:6	60	350	180	60
13	FPR#8@MC	239	55	1:6	60	294	143	59
14	FPR#3@MC:CA/061-1	243	55	1:6	60	298	160	65
15	FPR#3@MC:CA/CU - 1	232	55	1:6	60	287	153	65
16	FPR#8@MC:CA/CU - 1	197	50	1:6	40	247	130	65
17	FPR#3@MC:CA/MMF - 1	212	55	1:6	40	267	139	65
18	FPR#8@MC:CA/MMF - 1	219	55	1:6	50	274	144	65
19	FPR#3@MC:CA/CB- 1	238	55	1:6	40	293	157	65
20	FPR#8@MC:CA/CB- 1	231	55	1:6	40	286	152	65

<sup>1</sup> Las cantidades corresponden a probetas de 4x4x16 elaboradas de acuerdo a la norma IRAM 1622.

<sup>2</sup> Proporción por volumen agregado:cemento

<sup>3</sup> Contenido total de cemento = CPF<sub>APR</sub> + CPF<sub>probeta</sub>

<sup>4</sup> Agua:cemento = 0,7

<sup>5</sup> Agua:cemento = 0,5.

<sup>6</sup> APR:arena fina de rio:cemento = 1:1:5.



Figura 6. 14: Probetas de mortero con APR y FPR como agregado.

#### 6.4.1. Conductividad térmica

##### 6.4.2.13. Criterios de selección de muestras

La selección de muestras se relaciona con lo ya obtenido anteriormente. Para este ensayo resulta necesario incorporar probetas que contengan el APR en diferentes tamaños para evaluar si el contenido de plástico interfiere en el comportamiento aislante.

El tipo de cemento no es determinante por lo que escogieron las muestras con cemento de albañilería de la Serie 2 que responden a criterios de viabilidad económica y técnica.

Se incorpora la probeta patrón de arena gruesa y las probetas con APR de diferentes carbones activados con el objetivo de establecer, si existiera alguna diferencia significativa respecto a este parámetro con la modificación de la adición.

##### 6.4.2.14. Metodología

Para evaluar la conductividad térmica se desarrolló un sistema de medición en laboratorio siguiendo los lineamientos de la norma IRAM 11559:1995 [247] “Acondicionamiento térmico. Determinación de la resistencia térmica y propiedades conexas en régimen estacionario. Método de placa caliente con guarda”.

El equipo desarrollado consistió en una placa caliente donde se sustituyeron las resistencias de guarda, propuestas originalmente en la norma, por una capa de material aislante. La parte inferior fue calentada por una resistencia eléctrica a la cual se aplicó una diferencia de potencia, variada y controlada desde un variador de tensión, logrando así diferentes valores de potencia eléctrica. Una placa fría en la parte superior expuesta al ambiente recibía el flujo calórico, a modo de sumidero. Ambas placas poseen sendos orificios en los cuales se coloca la termocupla. La probeta se ubicó entre ambas placas, de modo tal, que una de sus caras estuviera en contacto con la placa caliente y la otra en contacto con la placa fría. Todo el conjunto se encuentra rodeado de un material aislante, para evitar fugas de calor por la parte inferior y laterales. El dispositivo desarrollado puede verse en la Figura 3.



Figura 6. 15: Equipo usado para medir la conductividad térmica. Adaptación del equipo bajo la Norma IRAM 11559:1995.

#### 6.4.2.15. Resultados

Los resultados obtenidos para conductividad térmica se muestran en la Figura 6.16.

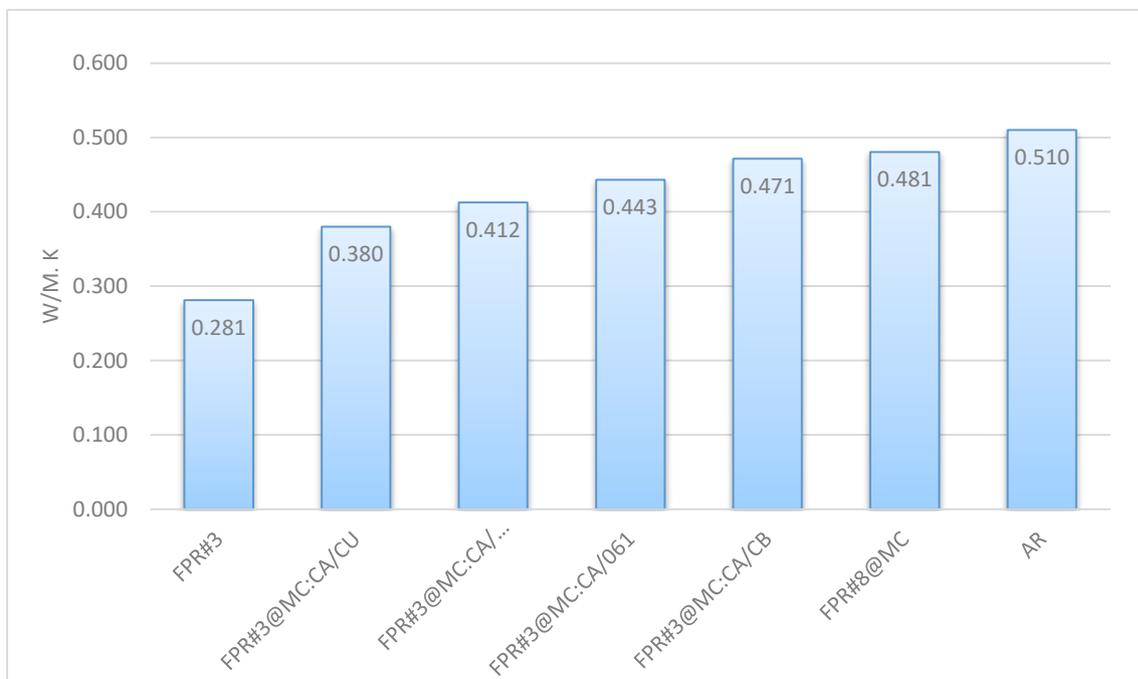


Figura 6. 16: conductividad térmica de las probetas con diferentes APR.

Los resultados arrojaron que el valor obtenido para el patrón elaborado con arena y cemento en este ensayo fue de 0,51 W/m °C, similar a los valores encontrados en bibliografía [248] lo cual demuestra la exactitud del equipo de medición.

En relación a las probetas con APR, es sabido que hay varios factores que influyen en la conductividad térmica de los materiales. En el caso de los composites, si bien no hay una relación directa entre la conductividad de cada material constituyente con la conductividad final, si es posible identificar ciertos patrones que determinan de manera aproximada el comportamiento general. De esta forma, tanto la densidad aparente que se relaciona a la forma en que se combinan los materiales, como a la naturaleza de los mismos son factores sobre los cuales es posible predecir un comportamiento.

En lo que respecta a los materiales poliméricos, es sabido que tienen menor conductividad térmica que los agregados naturales, por lo cual es de esperar que la probeta elaborada con FPR#3 tenga menor conductividad térmica que el patrón. En este caso se pudo medir un valor de 0,28 W/m °C, significativamente menor al agregado natural. En las probetas elaboradas con APR, los valores son bastante similares entre sí, con pequeñas variaciones en función del tipo de carbón activado usado en la coraza, lo cual demuestra que este aditivo no tiene influencia en la conductividad. Por otro lado, se observó que sin este aditivo el valor de conductividad fue el más próximo al patrón, FPR#8@MC, lo cual podría explicarse por una mayor cantidad de cemento en la coraza. Una tendencia que quedó evidenciada en este estudio, es que el tamaño del APR fue un factor de influencia en la conductividad. Así, el APR elaborado con FPR de 3 mm tiene valores de conductividad menor que con las partículas de mayor tamaño, lo cual posiblemente está ligado a la densidad aparente del material.

Si se analizan los valores de densidad aparente de las probetas, lo cual se sabe que es un factor de influencia en la conductividad térmica del material, también es posible encontrar una tendencia clara que relaciona estos parámetros. En los extremos de la gráfica se encuentran el patrón con el mayor valor de conductividad y una  $\rho=1,5 \text{ g/cm}^3$  y el mortero con la FPR en reemplazo del agregado natural con el valor menor de  $\rho=0,8 \text{ g/cm}^3$  y la menor conductividad. De esta forma, es posible inferir una mayor conductividad térmica cuanto mayor es la densidad aparente. Entre las probetas con APR la tendencia no es muy clara y los valores de densidad rondan los  $1,2 \pm 1 \text{ g/cm}^3$ . Sin embargo, la probeta con el APR FPR#3@MC:CA/CU fue la que menor conductividad térmica evidenció, esto quizá esté relacionado con la densidad total de la probeta.

#### 6.4.2. Resistencia a la compresión

Si bien ya fue reportado por otros autores como Alqatani y col [154] que, un hormigón fabricado con agregados sintéticos en un 100% de reemplazo resulta capaz de alcanzar una resistencia a la compresión de entre 14 a 18 MPa y alcanza una densidad de entre 510 a 750 kg/m<sup>3</sup> pudiendo ser aplicado a sólo elementos no estructurales, resulta necesario en un trabajo de un material innovador que será utilizado en componentes constructivos conocer este comportamiento más allá de que el mismo resultara o no portante.

##### 6.4.2.16. Criterio de selección de muestras

Las muestras seleccionadas responden a lo que ya ha sido comprobado en los ensayos anteriores. Como primera medida se seleccionaron probetas que contienen APR tanto de la Serie 1 como de la Serie 2, es decir con cemento CPF y con cemento de albañilería. Más allá de que la modificación del material aglomerante no haya estado relacionada con una búsqueda de mejores prestaciones mecánicas si no con una búsqueda de viabilidad tecnológica y económica, se analizará esta variable de todas formas para obtener mayor información sobre el material. Se presentan probetas en la Serie 1 con dos relaciones agregado:cemento diferentes 1:6 y 1:4 para determinar la mejor composición de acuerdo al comportamiento mecánico. Se incorporó una probeta patrón como referencia y, de la Serie 2 se toman las probetas con tamaño de FPR#3 y FPR#8 frente FPR#3@MC y FPR#8@MC para establecer diferencias en relación al tamaño de partícula. De las muestras con carbón activado se seleccionó la que menor conductividad térmica arrojó en el respectivo ensayo; FPR#3@MC:CA/CU-1.

La arena de río agregada a las probetas de mortero cuenta con un módulo de finura de 4,09 determinado según las normas IRAM 1505 [195], una densidad relativa real de 2650 kg/m<sup>3</sup> determinada según las normas IRAM 1520 [233] y una densidad relativa aparente de 1480 kg/m<sup>3</sup>.

6.4.2.17. Metodología

Se evaluó la Resistencia a la Compresión Axial a los 28, 60 y 120 días según norma IRAM 1622 [15] “Cemento Portland. Determinación de resistencias mecánicas”. Debido a que la resistencia a la compresión determina la posibilidad de aplicación en mampostería portante o no, es decir. Si un ladrillo que presenta una resistencia a la compresión mayor a 5 MPa podrá ser aplicado en construcciones portantes no así uno con una resistencia menor, qué solo podrá ser aplicado en cerramientos.



Figura A. 1: Probeta de mortero con APR siendo ensayada a compresión.

6.4.2.18. Resultados

En la Tabla 6. 7 se muestran los resultados de resistencia a la compresión a diferentes edades de curado.

Tabla 6. 7: resistencia a la compresión para probetas de APR, FPR y arena gruesa como agregado a 28, 60 y 120 días.

Entrada	Agregado	AG:CPF 1	$\rho^2$ (kg/m <sup>3</sup> )	T <sub>máx</sub> <sup>3</sup> (MPa)		
				28 días	60 días	120 días
<b>Serie 1</b>						
1	Arena gruesa	1:6	(194 ± 3)	(6,8 ± 0,6)	(4,3 ± 0,1)	(6,3 ± 0,7)
2	FPR#3	1:6	(80 ± 2)	(2,6 ± 0,2)	(2,8 ± 0,3)	(2,3 ± 0,2)
3	FPR#3@CPF	1:6	(100 ± 3)	(4,9 ± 0,2)	(4,6 ± 0,2)	(5,2 ± 0,3)
4	FPR#3@CPF:CA	1:6	(96 ± 4)	(2,4 ± 0,4)	(2,8 ± 0,3)	(4,3 ± 0,7)
5	Arena gruesa	1:4	(212 ± 2)	(14 ± 1)	(11 ± 1)	(12,5 ± 0,5)
6	FPR#3	1:4	(95 ± 4)	(6,6 ± 0,3)	(6,5 ± 0,5)	(7,2 ± 0,1)
7	FPR#3@CPF	1:4	(109 ± 4)	(8,3 ± 0,6)	(8,1 ± 0,8)	(11,8 ± 0,4)
8	FPR#3@CPF:CA	1:4	(120 ± 5)	(12 ± 1)	(14 ± 1)	(12,2 ± 0,7)
9	FPR#3@CPF:AR <sup>4</sup>	1:1:5	(115 ± 3)	(3,9 ± 0,3)	(5,7 ± 0,5)	(5,0 ± 0,4)
<b>Serie 2</b>						
10	FPR#3	1:6	(80 ± 5)	(2,4 ± 0,2)	(2,3 ± 0,3)	(1,0 ± 0,5)
11	FPR#8	1:6	(82 ± 4)	(2,2 ± 0,4)	(1,5 ± 0,3)	(1,4 ± 0,6)
12	FPR#3@MC	1:6	(118 ± 6)	(4,4 ± 0,3)	(4,0 ± 0,9)	(3,3 ± 0,7)
13	FPR#8@MC	1:6	(119 ± 8)	(4,4 ± 0,3)	(4,6 ± 0,7)	(4,4 ± 0,6)
14	FPR#3@MC:CA/CU	1:6	(116 ± 3)	(3,2 ± 0,1)	(4,6 ± 0,6)	Nd <sup>5</sup>
15	FPR#8@MC:CA/CU	1:6	(120 ± 2)	(4,9 ± 0,4)	(4,4 ± 0,7)	Nd

<sup>1</sup>Proporción por volumen de agregado: cemento.

<sup>2</sup>Densidad aparente de las muestras (x10<sup>1</sup> kg/m<sup>3</sup>)

<sup>3</sup>La resistencia a la compresión fue calculada a los 28, 60 y 120 días de curado del cemento y el resultado es el promedio de una serie de tres probetas por agregado.

<sup>4</sup>En estas muestras, una parte de APR fue reemplazada por una parte de arena gruesa de río.

<sup>5</sup>No determinado.

La resistencia a la compresión obtenida para el mortero de arena fue de 6,8. El valor supera el determinado por la normativa CIRSOC que define que un mortero de arena a los 28 días debe alcanzar una resistencia mayor a 4 MPa. Para el caso de FPR#3, en una proporción 1:6 de agregado:cemento después de 28 días de curado, la probeta alcanzó una resistencia a la compresión de 2,6 MPa (entrada 2) y se mantuvo sin cambios significativos hasta los 120 días de curado ( $2,6 \pm 0,2/2,8 \pm 0,3/2,3 \pm 0,2$ ). Este valor es suficiente para un ladrillo no estructural según la norma IRAM 12566-1[217].

En el caso de la probeta de la Serie 2, entrada 10 sí se observa un claro decrecimiento a los 120 días. Ambas mezclas (entradas 2 y 10) son equivalentes solo que desarrollaron en diferentes momentos del trabajo, lo que puede haber provocado alguna diferencia experimental significativa en relación al contenido de agua de amasado agregada, temperatura ambiente, etc.

Al modificar la relación agregado:cemento en la probeta (entrada 6), el valor de resistencia se mantiene estable en el tiempo alcanzando valores significativamente mayores en comparación con las relaciones 1:6. Esto se relaciona directamente con la mayor cantidad de cemento que presenta la probeta.

Cuando se modifica el tamaño de partícula (entrada 11) la resistencia disminuye de manera significativa en relación a FPR#3 pero se mantiene estable en relación al tiempo. Aquí la naturaleza del agregado se torna determinante, una partícula plástica, con su textura lisa y forma plana y puntiaguda, interfiere en la cohesividad de la pasta haciendo necesario un incremento de agua para mantener la consistencia adecuada. Esta mayor incorporación de agua, tal como concluyó Taus [223], produjo la formación de canales y poros en donde buscó alojarse el agua. Estos canales, según Rodrich y col. [153] interfieren directamente en las propiedades finales del mampuesto, como por ejemplo en la resistencia a la compresión. Los resultados aquí descriptos coinciden con los obtenidos por otros autores y presentados en el Capítulo 4. Sección 4.2.2; Ramenzianpour [219] comprobó que cuando se incorporan partículas plásticas en morteros de cemento, su morfología irregular interfiere de manera negativa en la formación de la interfase de cohesión con el cemento por la reducción de la superficie de contacto, lo que genera finalmente una disminución en resistencia a la compresión. Esto también fue asegurado por Banthia [221] y Metha y Monteiro [189] quienes incorporan el factor tamaño de partícula como otro parámetro que interfiere negativamente en la mezcla de concreto alterando la interfase.

Sidique relacionó las disminuciones en resistencia a la compresión con la menor densidad de las muestras y sus cambios en la estructura interna. Aquí, la diferencia entre las probetas con FPR (entradas 2, 6, 10 y 11) presentaron una significativamente menor densidad que el patrón de arena (entrada 1), esto indica que nos encontramos ante un comportamiento esperado. En las probetas preparadas con FPR, se produjo desprendimiento del agregado durante el ensayo.

Ahora al comparar el patrón de arena con las muestras de FPR#3@CPF o FPR#3@MC vemos disminuidas las resistencias a la compresión en todas las edades. Este resultado puede atribuirse a la menor densidad de las muestras con el APR.

Se observa una diferencia en la resistencia cuando se comparan los dos tipos de cemento, quedando el CPF con valores mayores respecto a MC. Sin embargo, los valores para MC son suficientes para mampuestos no estructurales. El Reglamento INPRES-CIRSOC 103 [249] determina una resistencia mínima a compresión a 28 días para morteros fabricados con cemento de albañilería de 2,5 MPa. Todos los valores arrojados a los 28 días en las entradas 12 a 15, se mantienen dentro de lo indicado por la norma.

En las entradas 4 y 8, se muestran los resultados arrojados para la probeta con carbón activado “Merck”, como dijimos en el capítulo 5, este carbón es de difícil acceso y costoso. Puede verse en estas muestras que la modificación en la relación agregado:cemento incrementó significativamente la resistencia a la compresión de las probetas y su densidad. Esto responde nuevamente a la mayor cantidad de cemento incorporada en la probeta y no resulta suficiente para evaluar el contenido del aditivo en el árido.

Cuando se reemplazó al carbón activado “Merck” por el de uso comercial en FPR#3@MC:CA/CU en la relación agregado:cemento 1:6, la resistencia a la compresión mejoró considerablemente. Más allá de que por complicaciones técnicas durante el desarrollo del ensayo, las muestras FPR#3@MC:CA/CU no hayan podido ser analizadas a 120 días, se observa una tendencia de aumento de la resistencia conforme pasa el tiempo.

Comparando las probetas de APR sin carbón activado (FPR#3@MC y FPR#3@MC:CA/CU) puede observarse una leve disminución general de la resistencia a la compresión cuando se incorpora el aditivo inerte. Esta disminución podría deberse a una inhibición del fraguado del cemento producida por el carbón activado ya comprobada por Frías y col. [165] y por Gallego y col [250]. Sin embargo, a la edad de 120 días, la resistencia a la compresión de la probeta fabricada con FPR#3@CPF:CA aumentó a 4,3 MPa, mejorando así su resistencia en comparación con FPR#3 pero quedando siempre por debajo de FPR#3@CPF o FPR#3@MC. Puede verse entonces que, en tiempos cortos de fraguado el carbón activado presenta un efecto marcado en la resistencia a la compresión de la probeta, aunque se puede determinar que se trata de un comportamiento cinético, que ya fue descrito por Hewlett [251] que hace que, a tiempos largos se alcancen los incrementos en la resistencia esperados. Aunque las muestras con carbón activado hayan arrojado menor desempeño frente a resistencia a la compresión que las muestras sin el aditivo, el valor resulta suficiente para los requerimientos esperados en este trabajo.

Aquí, retomando lo reportado por Alqahtani y col. [154] se mantiene que este tipo de agregados funcionarían sólo en construcciones no portantes y que las probetas con APR alcanzaron en promedio, valores de densidad de  $110 \text{ kg/m}^3$  (promedio de las muestras FPR#3@CPF:CA, FPR#3@CPF:CA de relación agregado:cemento 1:6 y 1:4 y FPR#3@MC:CA/CU) quedando en un 12% por debajo de lo reportado por el autor. Asimismo, para resistencia a la compresión a 60 días, estas probetas arrojaron un promedio de  $7,16 \pm 0,6$ , lo que corresponde a un 40% menos de resistencia

#### 6.4.3. Resistencia a la flexión

La resistencia a la flexión es una medida de la resistencia a la tracción del mortero u hormigón. Determina la resistencia a la falla de una viga no reforzada. Se expresa como el módulo de rotura (MR) en MPa. El Módulo de Rotura deberá ser cercano al 10 o al 20% de la resistencia a la compresión y el Reglamento CIRSOC 501 [142] determina que el módulo de rotura para elementos de mampostería sometidos a flexión perpendicular al plano del muro debe estar entre los 0,5 y 1,0 MPa.

##### 6.4.3.19. Criterio de selección de muestras

Los agregados elegidos para incorporar a las probetas que serán ensayadas a flexión son los mismos de los agregados que fueron ensayados a compresión, pero en este caso se extrajo el grupo con relación agregado:cemento 1:4 ya que se comprobó que las probetas 1:6, cumplen con los requisitos esperados. Aquí debe aclararse que, por inconvenientes técnicos, primera serie de probetas fue ensayada a 28 días, pero, ya las Serie 2, cumplió con las mediciones a 28, 60 y 120 días. No se espera que esta ausencia genere diferencias significativas.

6.4.3.20. Metodología

La resistencia a la flexión se determinó mediante norma ASTM C293 [252], “Método de Ensayo Estándar para Resistencia a la Flexión del Concreto (Usando una Viga Simple con Carga al Centro del Claro)” (Figura 6.17) con una longitud de apoyo de 100 mm y probetas prismáticas de mortero de iguales dimensiones a las probetas preparadas para medir resistencia a la compresión (40x40x160 mm). El ensayo se desarrolló en un dispositivo de flexión con una capacidad de carga de 10 kN (Figura 6.18) y cada una de las probetas se ensayó a una velocidad de 1 mm/min.

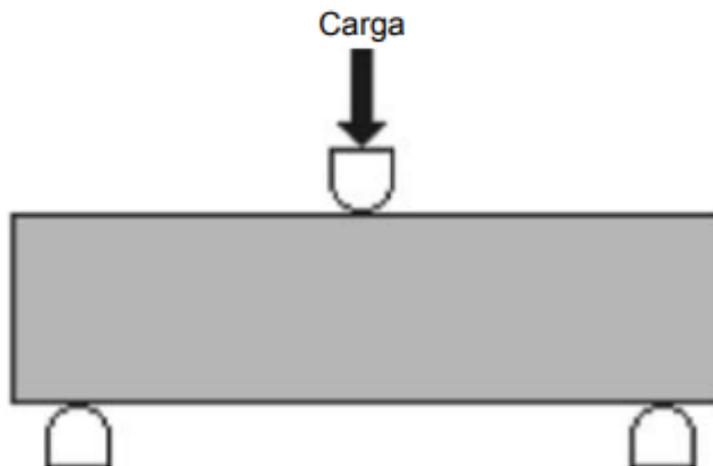


Figura 6. 17: esquema de ensayo de flexión con carga en el punto medio. La tensión máxima sólo se producirá en el centro de la viga.



Figura 6. 18: prensa y controlador para ensayo de flexión.

## 6.4.3.21. Resultados

En la Tabla 6.8 se muestran los resultados de resistencia a la flexión para las probetas desarrolladas.

Tabla 6. 8: resistencia a la flexión de las probetas con relación agregado:cemento 6:1.

Muestra	Agregado	Ag:Cem	TMax (MPa) 28 días		
<b>Serie 1</b>					
1	Arena gruesa	1:6	(2,8± 0,0)		
2	FPR#3	1:6	(0,6 ± 0,1)		
3	FPR#3@CPF	1:6	(2,0 ± 0,1)		
4	FPR#3@CPF:CA	1:6	(1,9 ± 0,4)		
<b>Serie 2</b>					
			<b>28 días</b>	<b>60 días</b>	<b>120 días</b>
1	FPR#3	1:6	(0,5 ± 0,0)	(0,3 ± 0,0)	(0,2 ± 0,1)
2	FPR#8	1:6	(0,6 ± 0,7)	(0,5 ± 0,0)	(0,2 ± 0,1)
3	FPR#3@MC	1:6	(1,1 ± 0,1)	(1,4 ± 0,2)	(1,4 ± 0,3)
4	FPR#8@MC	1:6	(1,4 ± 0,4)	(1,4 ± 0,3)	(1,4 ± 0,3)
6	FPR#3@MC:CA/CU	1:6	(1,1 ± 0,1)	(1,4 ± 0,1)	Nd <sup>1</sup>
7	FPR#8@MC:CA/CU	1:6	(1,6 ± 0,1)	(1,3 ± 0,3)	Nd

<sup>1</sup>No determinado

Vemos en la primera serie cómo al recubrir la partícula de FPR, al igual que en el caso de la resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión se incrementa significativamente; de 0,6 a 2,0 MPa (entradas 2 y 3 respectivamente). Por lo que se piensa que estarían afectando los mismos factores relacionados al incremento en la adherencia del agregado y la matriz debida a la presencia de APR en vez de FPR, y a la mejor cohesión y menor desprendimiento de las partículas estando las mismas recubiertas. Los resultados aquí demostrados coinciden con lo encontrado por Popovici y col. [228] quienes encontraron resultados para flexión aceptable pero una mezcla que requirió mayor demanda de agua atribuible a factores como la forma heterogénea del plástico, la relación agua cemento, la resistencia propia del agregado y la actividad puzolánica. La misma tendencia arrojó la adición de carbón activado en la mezcla, se repitió el leve descenso de la resistencia a la compresión, en la resistencia a la flexión. Se espera que, a la edad de 120 días, se produzca el mismo incremento en la resistencia que se pudo ver para el caso de la compresión. De todas maneras, al momento, los valores en todos los casos son suficientes para cumplir con lo determinado por el Reglamento CIRSOC 501 sobre el módulo de rotura por carga de flexión en mamposterías de resistencia normal, incluso podemos ver que la resistencia a flexión y la resistencia a la compresión se van correlacionando de manera directamente proporcional en todas las muestras.

Respecto a las probetas correspondientes a la segunda serie de ensayos; se observa que al reemplazar CPF por cemento de albañilería (MC) disminuye levemente la resistencia a la flexión en las tres edades, pero el valor se mantiene entre los límites que indica el reglamento. Cuando se incorpora CA, no se observan cambios significativos entre las muestras ni respecto a MC.

Como se mencionó en la introducción de este apartado, el Módulo de Rotura deberá ser cercano al 10 o al 20% de la resistencia a la compresión; En la tabla 6.9 se expresan las relaciones obtenidas.

Tabla 6. 9: relación valores de compresión frente a los de flexión para probetas representativas.

Agregado	Compresión/Flexión (%)
FPR#3	20
FPR#8	27
FPR#3@MC	25
FPR#8@MC	31
FPR#3@MC:CA/CU	22
FPR#8MC:CA/CU	32

Podemos ver en la tabla que las relaciones entre compresión y flexión superan a lo determinado por la norma en todos los casos. Aquí, como ya fue determinado por Metha y Monteiro [189] incorporar plásticos en las mezclas de mortero genera una disminución en la resistencia a la compresión debida a una cohesión pobre entre el plástico y el cemento, pero al mismo tiempo produce un aumento en la resistencia a la flexión. Aquí podemos ver incluso que con partículas más grandes (FPR#8), la relación aumenta. Por otro lado, los valores para flexión, en comparación con los de compresión, sí se encuentran dentro del rango permitido por la norma para elementos de mampostería sometidos a flexión perpendicular al plano del muro que deben estar entre los 0,5 y 1,0 MPa.

#### 6.4.4. Capacidad y velocidad de succión capilar

Los parámetros de succión capilar están relacionados con los aspectos de durabilidad de los morteros. Si bien ya ha sido demostrado que, el material será incorporado en elementos constructivos no portantes, resulta relevante analizar este factor debido que brinda información sobre estructura interna de los morteros y permite determinar en qué ambientes es factible aplicar el material asimismo si podría funcionar en contacto con el agua. Es un mecanismo de transporte que puede favorecer el ingreso de agentes agresivos, cloruro en ambientes marinos, carbonatación en ambientes industriales, ingreso de sulfato, agua, etc. por lo que se procura obtener valores de succión capilar bajos para disminuir el ingreso de los mismos. Una baja velocidad de succión indica, en general, un hormigón con propiedades de transporte satisfactorias para asegurar una vida útil aceptable de la estructura [323]. Factores como, la naturaleza de los agregados y el tamaño de los mismos interfieren directamente en las propiedades de transporte. En este sentido, para el desarrollo de esta tesis se considera que determinar los parámetros de succión capilar es relevante debido a que se ensayarán probetas con FPR directamente en la mezcla de mortero, APR con y sin carbón activado y APR con arena fina como agregado secundario. Porrero y col. [219], determinaron que mezclas con partículas de mayor tamaño presentarán una mayor succión de agua y que, una partícula alargada y plana interfiere en la porosidad; la sortividad es un parámetro indirecto para examinar la porosidad interior del mortero [168], por lo que determinarla permitirá arribar también al conocimiento del interior de la probeta. Hall y col. [246], determinaron de manera general que cuando la densidad y la porosidad disminuyen, aumenta la succión capilar, por lo que es necesario comprobar si materiales con densidades muy dispersas como lo son el plástico y los APR presentarán modificaciones en las propiedades de transporte. Respecto a los porcentajes de reemplazo, diversos trabajos analizan el comportamiento de la adición de partículas de plástico PET en morteros de cemento. Yun Wang Choi y col., [168], encontraron que, con menor porcentaje de plástico, menor es la sortividad, al superar el 50% de reemplazo, la porosidad interna del mortero se incrementa, lo que aumenta en consecuencia la succión capilar. Esto también es afirmado por Marzouck y col. [167] que, mediante imágenes SEM, observaron en estas probetas una estructura cavernosa que es generada por la hidrofobicidad del PET. El mismo, en morteros de cemento contribuye a ralentizar la propagación del frente de imbibición, forzando y evitando el flujo, es decir aumentando la tortuosidad. Akcaozoglu y col.,

[169], encontraron que un porcentaje de reemplazo del 100% incrementa significativamente la succión capilar y que los incrementos comienzan a partir del 3% de reemplazo.

#### 6.4.4.22. Criterio de selección de muestras

En este sentido las muestras fueron seleccionadas siguiendo los mismos criterios de los ensayos mecánicos anteriores. Se incorporaron probetas de arena como patrón, probetas de FPR para establecer comparaciones con los resultados arrojados por otros autores y las probetas de APR FPR#3@MC:CA/CU en los dos tamaños para poder establecer comparaciones relacionadas a este factor. Aquí, para llegar a resultados más claros se trabajó con las probetas cuyo APR estuvo generado cemento de albañilería por ser este el preferible bajo requerimientos de viabilidad técnica y económica y sus prestaciones resultan suficientes para alcanzar los requerimientos para elementos no portantes.

#### 6.4.4.23. Metodología

El método de ensayo de la norma IRAM 1871 [253] "Hormigón. Método de ensayo para determinar la capacidad y la velocidad de succión capilar de agua del hormigón endurecido" establece los procedimientos para la determinación de la capacidad y la velocidad de succión capilar de agua del hormigón endurecido. La norma establece un método gravimétrico que permite calcular tanto la capacidad como la velocidad de succión capilar.

El Reglamento CIRSOC 201 [184] establece como criterio prescriptivo para asegurar la durabilidad que los hormigones de estructuras que estarán sometidos a cualquier clase de exposición correspondiente a un medio agresivo, deben tener una velocidad de succión capilar menor o igual a  $4 \text{ g/m}^2 \text{ s}^{-1/2}$ , medida con el ensayo de la norma IRAM 1871 [253].

#### 6.4.4.24. Resultados

En la Tabla 6. 10 se muestran los resultados de la capacidad de succión capilar para los agregados y en la Figura 6. 19 se muestran los resultados correspondientes a la velocidad de succión capilar.

Tabla 6. 10: capacidad de succión capilar de las probetas con AR, FPR y APR cómo agregado.

Entrada	Agregado	Ag:MC	Cit (g/m <sup>2</sup> )	$\rho^1$
1	Arena	1:6	6177,8	194 ± 3
2	FPR#3	1:6	17500	80 ± 5
3	FPR#3@MC	1:6	17750	118 ± 6
4	FPR#3@MC:CA/CU	1:6	22875	116 ± 3
5	FPR#8@MC:CA/CU	1:6	19313	120 ± 2

<sup>1</sup>Densidad aparente de las muestras ( $\times 10^1 \text{ kg/m}^3$ )

En relación a la capacidad de succión capilar se observa una tendencia en relación a la densidad de la probeta. Podemos ver que, la probeta de FPR#3, que presenta una densidad mucho menor en relación a la probeta con arena, adquiere una capacidad de succión mucho mayor. Aquí los canales que se forman por la estructura cavernosa explicada por Marzouck y col. [167] actúan como tubos angostos en donde el agua sube con mayor facilidad y se los producen los fenómenos de capilaridad. Esto sucede porque la cohesión intermolecular del agua es menor que su adhesión con el material del canal por donde asciende. Así, seguirá subiendo hasta que la tensión superficial sea equilibrada por el peso del líquido. La capilaridad es una propiedad de los fluidos que depende de su tensión superficial, la cual, a su vez, depende de la cohesión del fluido, y que le confiere la capacidad de subir o bajar por un tubo capilar. Por su parte, Hall y col. [246], determinaron de manera general que

cuando la densidad y la porosidad disminuyen, aumenta la succión capilar, por lo que es esperable que en FPR#3, la capacidad de succión capilar sea mayor. Esto será retomado cuando se analice la porosidad de las probetas en el siguiente punto.

Comparando FPR#3 con FPR#3@MC, a pesar de esta última presenta una densidad significativamente mayor, la capacidad de succión capilar es muy similar entre las mismas. Esto quizá se deba a la porosidad; que será evaluada más adelante, que puede verse afectada por el consumo de agua durante la etapa de mezclado. Como se explicó en el apartado 6.4; la relación agua:cemento de las probetas no fue determinada de manera uniforme, el agua fue siendo incorporada a las mezclas en la medida que mejoraba la trabajabilidad de la misma. Este factor podría haber interferido en la porosidad y por lo tanto en la capacidad de succión capilar. Ahora, en relación a las probetas de APR con carbón activado; FPR#3@MC:CA/CU presenta una densidad cercana pero menor que FPR#3:CM y una capacidad de succión capilar significativamente mayor; el valor más alto de la muestra. Esto quizá se deba la mayor superficie específica del carbón activado.

En relación al tamaño de partícula de APR; entre FPR#3@MC:CA/CU y FPR#8@MC:CA/CU se observa una capacidad de succión capilar levemente menor para ese último, pero con una densidad levemente mayor. Si bien las diferencias no son significativas, aquí; como la menor densidad de la probeta seguramente esté dada por la mayor cantidad de plástico que presenta la partícula de tamaño 8 mm, este factor no interfiere directamente a con la capacidad de succión capilar. Al estar la partícula recubierta por cemento, la adherencia matriz-refuerzo mejora por lo que los surcos disminuyen y, finalmente la capacidad de succión capilar termina siendo menor que en FPR#3@MC:CA/CU por más que el agregado tenga mayor tamaño.

A continuación, se muestra la gráfica de velocidad de succión capilar para las muestras seleccionadas y desarrollada según la norma IRAM 1871.

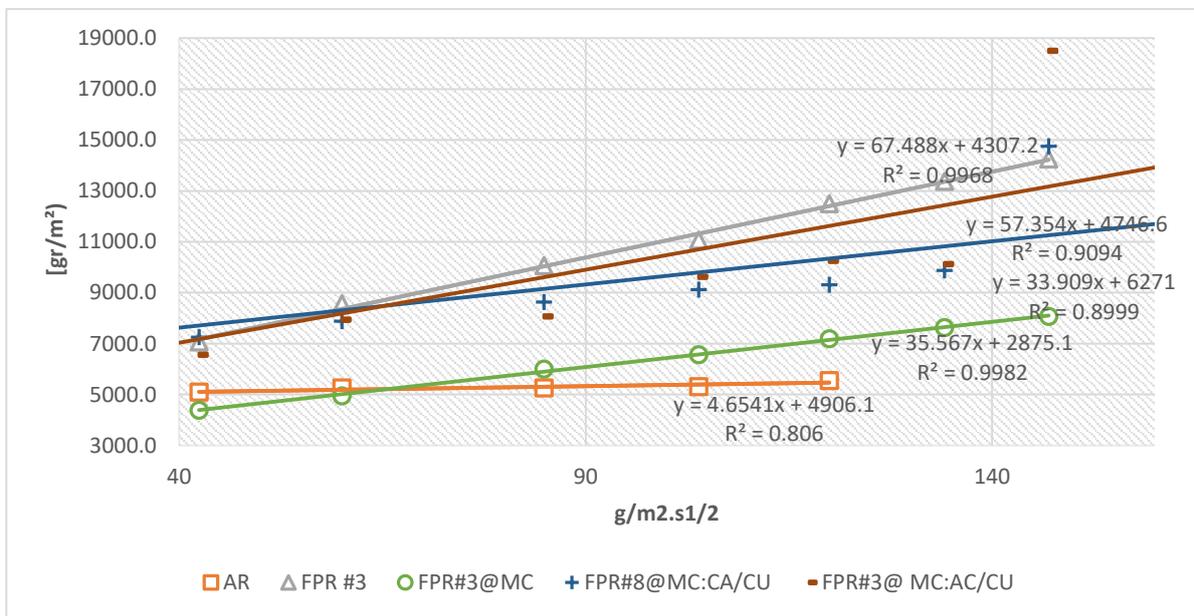


Figura 6. 19: velocidad de succión capilar para las muestras mencionadas.

Se observa claramente un desempeño significativamente inferior para velocidad de succión capilar entre las probetas patrón y las probetas estudiadas. La probeta patrón alcanza una velocidad coincidente con la máxima que determina el reglamento CIRSOC ( $4 \text{ g/m}^2 \text{ s}^{1/2}$ ). Este resultado nos determina en primer término que los componentes no podrían ser utilizados en construcciones que puedan llegar a tener

contacto con humedad proveniente del terreno o directamente agua. De todas maneras, resulta interesante evaluar su comportamiento respecto a este parámetro.

La mayor velocidad alcanzada fue para FPR#3. Este resultado es acorde a los expresado por otros autores como Porrero y col. [201], Yun Wang Choi y col. [151] y Marzouck [150], quienes determinaron que una mezcla con plástico como árido requeriría que el reemplazo se mantenga entre el 3 y 30% para mantener las propiedades de transporte dentro de los parámetros acordes a un buen desempeño. El hecho de que la FPR se encuentre incorporada en un 100% en el mortero genera fallas en la adherencia con el mortero creando grietas que contribuyen a que el hormigón succione con mayor rapidez [222].

FPR#3MC arrojó una curva lineal y cercana a la muestra patrón. Cuando se midieron las muestras con carbón activado, tanto FPR#3 como FPR#8, presentaron comportamientos no lineales con puntos que se alejaron significativamente de la curva a las 72 h. Aquí el efecto retardador del fraguado del carbón activado sobre el cemento [165], [250] podría ser la causa de una mayor porosidad o defectos en la cohesión de la pasta que generan mayores canales de ascenso de líquidos.

FPR#8@MC:CA/CU presentó menor velocidad de succión capilar que las demás, pero como dijimos, el comportamiento no fue lineal. El tamaño del agregado interfiere aquí con la velocidad del ascenso del líquido. Al mismo tiempo, es esperable que, al presentar mayor tamaño la partícula, la capa de cemento y aditivo que la recubre sea más fina. En este sentido, las probetas hechas con FPR#3:CM y FPR#3:CA:CA/CU alcanzaron mayor velocidad de succión capilar por presentar una capa de recubrimiento de mayor espesor que absorbe el líquido más rápidamente.

#### 6.4.4.25. Porosidad

Analizando la succión capilar, frente a los encontrado en bibliografía y en esta tesis, se determinó que conocer la porosidad interna de cada probeta daría más información sobre sus propiedades de transporte. En este apartado se muestran los resultados sobre porosidad relacionadas con la densidad de la misma.

#### 6.4.5.25. Criterio de selección de muestras

Las muestras seleccionadas corresponden a las analizadas para succión capilar con el objetivo de ampliar la información sobre los comportamientos encontrados.

#### 6.4.5.26. Metodología

La porosidad se calculó pesando las muestras en seco y luego en estado “mojado con superficie seca”. Con las siguientes ecuaciones:

$$m = P_l - P_f$$
$$vol_{H_2O\ ab} = \frac{m}{\rho}$$
$$Porosidad = \frac{vol_{H_2O\ ab}}{vol\ prob} \cdot 100$$

Donde m corresponde al peso del agua absorbida y se calcula restando la masa seca a la masa húmeda. Para esto se colocaron las probetas en agua hasta peso constante (2 horas) y luego con un paño se secó cuidadosamente la totalidad de la superficie y se volvieron a pesar

Para calcular el volumen de agua absorbida se dividió el valor de  $m$  anterior por el valor de densidad del agua ( $1 \text{ g/cm}^3$ ) y luego, ese valor sobre el volumen de la probeta y multiplicado por 100, determinó su porcentaje de porosidad.

#### 6.4.5.27. Resultados

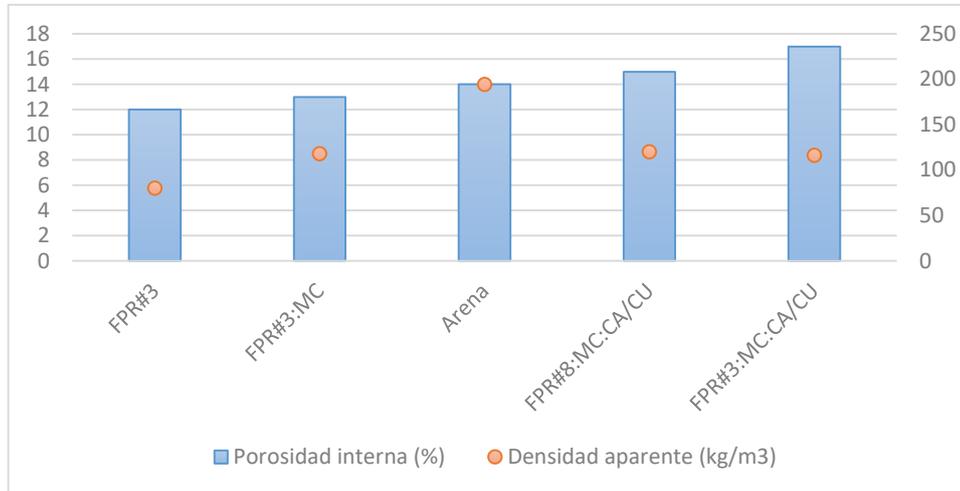


Figura 6. 20: : porcentajes de porosidad interna y densidad aparente de las probetas.

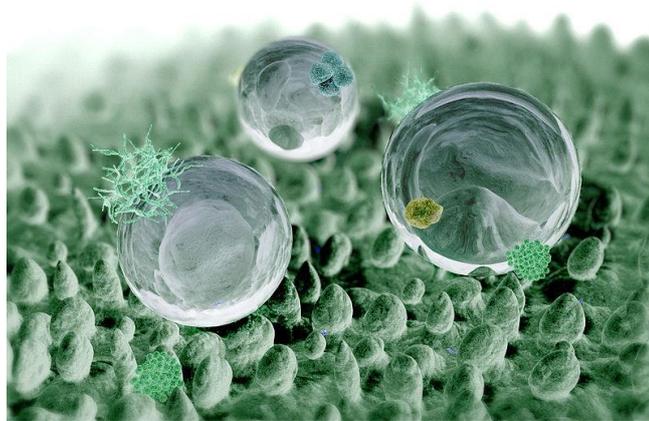
El hecho de que la probeta con arena presente la mayor densidad y una porosidad interna media en relación a las demás determina que la naturaleza del agregado es responsable del incremento en la porosidad. La menor porosidad en FPR#3 determina que los parámetros de succión capilar en este caso, no están relacionados a la porosidad, si no con la menor densidad, dada por el plástico. Ya, cuando la partícula plástica es recubierta por cemento+aditivo, la porosidad aumenta y la densidad se mantiene estable. El incremento en el agua de amasado necesaria para lograr una mezcla homogénea frente a la presencia de carbón activado interfiere en la porosidad interna de las probetas y, en efecto disminuye tanto, las propiedades de transporte y mecánicas de la misma. Estos resultados resultaron acordes a lo mencionado en el apartado de velocidad de succión capilar; la curva con puntos que se alejan de la linealidad en las probetas con carbón activado podría estar relacionada con una mayor porosidad debida a una mala cohesión entre componentes del mortero, que a la vez se relaciona con una interferencia en el fraguado dada por la presencia de carbón activado.

#### 6.4.4.28. Ángulo de contacto

El ángulo de contacto es un parámetro que permite determinar las interacciones entre una superficie y el agua. En la naturaleza pueden encontrarse ejemplos de esta relación; el efecto flor de loto, es el particular comportamiento que tiene la superficie de la flor de loto frente a la gota de agua. Las mismas, al caer sobre las hojas de la planta se deslizan sin romperse, permanecen esféricas arrastrando las partículas de polvo, lo que le otorga a la especie una capacidad de auto limpieza especial (Figura 6.21). El ensayo consiste en arrojar una gota de agua sobre la superficie y determinar primero, si se forma una gota, cuál es el ángulo entre la gota y la superficie y cuánto tiempo dura formada la gota. El valor del ángulo permite determinar si el material es hidrofílico o hidrofóbico. Cuando el ángulo presenta un valor superior a  $90^\circ$  se determina que la superficie es hidrófoba, es decir que repele el agua, permitiendo que la gota quede formada casi en su totalidad sobre la superficie del material. Cuando el valor del ángulo es menor a  $90^\circ$ , se determina que el material es

hidrofílico ya que el material absorbió rápidamente agua no permitiendo que la gota quede formada. Debido a que en este trabajo se combinan materiales de conocida naturaleza hidrofóbica como es la de los plásticos y, aglutinantes hidrofílicos como el cemento, resulta interesante conocer cómo se comportarán los mismos interactuando en una matriz. En el trabajo de tesis de Fernández Cañete [254] se ensayaron ángulos de contacto en probetas de cemento y el autor concluyó que en el mortero convencional sin ningún tipo de tratamiento superficial el ángulo de contacto no se forma, el agua se absorbe a los pocos segundos de ser aplicada. Finalmente, el tiempo en que tarda la gota en desaparecer de la superficie determinará la mayor o menos hidrofobicidad del material.

La determinación del ángulo de contacto nos permite conocer cuán hidrofóbico es el material, y así conocer en mayor profundidad los APR desarrollados. Por lo tanto, a continuación, se desarrollan los métodos y resultados para este ensayo.



*Figura 6. 21.:gotas de agua en la superficie de una hoja de loto de William Thielicke.*

#### *6.4.5.27.1.1. Criterio de selección de muestras*

Las muestras seleccionadas corresponden a las que se vienen analizando en succión capilar y porosidad ya que lo se busca aquí es completar la información sobre el desempeño de las misma para mecanismos de transporte.

#### *6.4.5.27.1.2. Metodología*

En esta investigación, los ángulos de contacto se establecieron mediante el ensayo de gota sésil, un método experimental que sirve para determinar la tensión superficial de una superficie sólida, consistente en la colocación de una gota sobre la superficie para medir el ángulo de contacto de la gota con dicha superficie. Para esto se desarrolló un sistema de goteo unidireccional vertical en el que, mediante una jeringa sujeta y fijada a una pinza vertical de sujeción de laboratorio se aplicó una gota de agua sobre la probeta posicionada de manera horizontal bajo el sistema descrito. La aplicación de la gota fue filmada con cámara digital usando un fondo verde para mejorar la definición del conjunto. Los videos tuvieron una duración de dos minutos y se extrajeron de los mismos los fotogramas correspondientes a los tiempos 0, 30, 60, 90 y 120 minutos. En cada fotografía se aplicó el plugin “*Drop\_analysis LB-ADSA*” en el software libre Image J. De esta manera se procedió a medir los ángulos de contacto iniciales y luego, el tiempo en que tarda la gota en desaparecer. En la Figura 6.22 se muestra la gota sobre la superficie de la probeta recién desprendida de la aguja y luego la

misma ya absorbida por la probeta y en la Figura 6.23 se muestra una captura de pantalla de la gota siendo calculadas sus medidas por el software indicado.

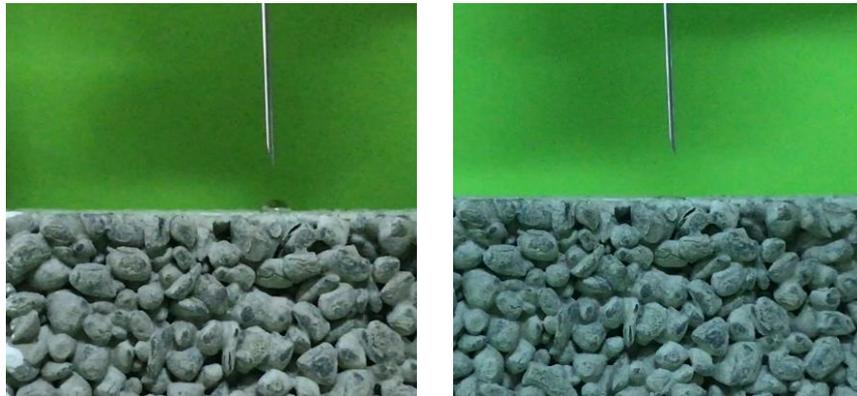


Figura 6. 22: ensayo de ángulo de contacto.

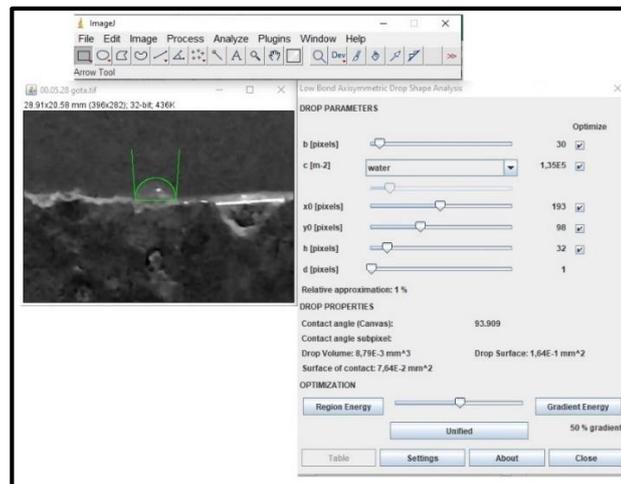


Figura 6. 23: cálculo de ángulo de contacto de la gota por el software image J.

#### 6.4.5.27.1.3. Resultados

En la tabla 6.10 se exponen los resultados obtenidos para ángulo de contacto.

Tabla 6. 11: Angulo de contacto en relación al tiempo para las muestras analizadas.

Muestra	Tiempo (segundos)					Tasa de dismunción de ángulo (°/s)
	0	30	60	90	120	
	Angulo de contacto (°)					
Arena	73.05	30.57	24.95	0	0	0.80
FPR#3	92	76.95	66.46	66.06	50.13	0.31
FPR#3@MC	75.98	73.43	65.98	64.99	64.64	0.10
FPR#3@MC:CA/CU	84.11	22.62	0	0	0	2.04
FPR#8@MC:CA/CU	75.08	56.90	53.88	51.52	31.53	0.30

Puede verse que la probeta con arena presentó un valor de ángulo de contacto a tiempo inicial de = 73° y una tasa de disminución de ángulo alta en comparación con las demás que genera la pérdida

completa de la gota a los 90 segundos. Esto resulta coincidente con lo establecido por Fernández Cañete [254] que concluye que, en un mortero sin ningún tipo de tratamiento superficial el ángulo de contacto no llega a formarse, el agua se absorbe a los pocos segundos de ser aplicada.

FPR#3 presenta un ángulo de contacto mayor a 90° que se mantiene estable en el tiempo. Este comportamiento responde a la hidrofobicidad del plástico.

Sin embargo, las muestras con carbón activado agregado tienen ángulos de contacto similares a la muestra de arena. Estos resultados pueden deberse a los efectos de la penetración de líquido dentro del material, que como se mencionó anteriormente, ha sido comprobado [254] que superficies altamente absorbentes influyen en los valores del ángulo de contacto.

La mayor porosidad de FPR#3@CM:CA/CU se relaciona entonces con la tasa de disminución del ángulo de contacto. La tasa es significativamente mayor esta probeta.

Al igual que con los parámetros de succión capilar, podemos ver que, cuando la capa de cemento+aditivo es de mayor espesor, el agua se absorbe más rápidamente y que, el carbón activado interfiere en el transporte de agua dentro de las mezclas, producto la menor superficie específica de sus granos.

## 6.5 Conclusiones de capítulo

En este capítulo se desarrolló la caracterización del material propuesto. De una gran masa de muestras se fueron analizando cada una de ellas comenzando por la capacidad del mismo de retener contaminantes metálicos y orgánicos, conductividad térmica, propiedades físicas, mecánicas hasta las propiedades de transporte, estableciendo elecciones basadas en dichos comportamientos bajo los criterios que fueron descritos en la introducción del Capítulo. Estos fueron:

- Estabilización/neutralización de contaminantes metálicos y orgánicos
- Viabilidad técnica y económica
- Conductividad térmica
- Propiedades mecánicas

Luego del desarrollo de los ensayos pudo concluirse que:

Respecto al criterio; estabilización/neutralización de contaminantes metálicos y orgánicos, la estrategia de encapsular las partículas de FPR en matrices de cemento permite obtener un agregado de base plástica en el que el antimonio, el principal metal peligroso presente en este tipo de residuos plásticos, se estabiliza eficazmente.

Para retener contaminantes orgánicos, resulta necesaria la incorporación de un aditivo adsorbente orgánico como el carbón activado que estabiliza el TBBPA y evita su lixiviado.

Todas las muestras de APR con carbón activado en un 1,1% resultan suficientes para cumplir con este criterio. Las primeras experiencias con los APR y luego, los ensayos químicos de detección de contaminantes orgánicos permitieron determinar que el material no puede ser sometido a temperaturas mayores a 50°C durante su uso, ya que su cáscara podría romperse y los contaminantes, tomar contacto con el ambiente. Por este motivo las demás muestras como, las de plástico sin encapsular y las que han sido recubiertas sólo con cemento deberían ser descartadas. Sin embargo, se continuará con su análisis en las demás propiedades para lograr conocimiento más global del agregado y de los factores que intervienen en sus propiedades mecánicas. Se recomienda luego de los análisis químicos que el mampuesto sea recubierto con un revoque de cemento para optimizar la aislación.

Respecto al criterio; viabilidad técnica y económica, el reemplazo de cemento portland convencional por cemento de albañilería se relaciona con la incorporación de un material más económico y accesible que, al mismo tiempo presenta propiedades aptas para revoques y mampostería y controla el consumo de agua lo cual es un factor determinante con áridos plásticos que hacen que el amasado de la mezcla requiera mayores cantidades de agua. El carbón activado comercial de cualquiera de las marcas propuestas es mucho más accesible y económico que el Merck. Al mismo tiempo, el carbón vegetal no resultó apto como aditivo neutralizador de contaminantes por lo que fue descartado, por lo que ambas adiciones fueron descartadas. Todas las muestras de APR con carbón activado comercial en con porcentaje de 1,1% resultan viables para responder a este criterio.

En relación al criterio, conductividad térmica; los mampuestos elaborados con el APR FPR#3@MC:CA/CU fueron los que alcanzaron la mayor aislación térmica por lo que se tornan una alternativa viable para este fin. Por lo que los demás carbones fueron descartados. En este sentido, mampuestos o ladrillos en muros no portantes podrían ser una buena aplicación del material.

En relación al criterio; propiedades mecánicas. El reemplazo de cemento portland por cemento de albañilería ocasiono una leve disminución en la resistencia a la compresión y la resistencia a la flexión. La incorporación de carbón activado en los APR ocasiono un retraso en el fraguado, lo que interfirió finalmente en las prestaciones mecánicas de resistencia a la compresión y flexión para los mampuestos con CA. El ajuste granulométrico con arena de río no arrojó mejoras significativas en las prestaciones mecánicas por la que la estrategia fue descartada. El agregado, FPR#3@MC:CA/CU, que respondió favorablemente a los criterios 1 y 2; al igual que los agregados similares desarrollados por otros autores, presentó valores de resistencia mecánica aptos sólo para construcciones no portantes o estructurales, quedando un 53% por debajo de los mampuestos de arena para resistencia a la compresión y, en un 61% por debajo para resistencia a la flexión.

Para capacidad y velocidad de succión capilar, porosidad y ángulo de contacto, se estableció que el material no podrá ser aplicado en partes de construcciones que estén en contacto con el suelo, en ambientes húmedos o en contacto con agua ya que es un material altamente poroso y de baja densidad cuyo ascenso de agua por capilaridad resulta superior al establecido por el Reglamento CIRSOC. El hecho de contener partículas plásticas hace que el material presente una estructura interna cavernosa, porosa e irregular.

En la Tabla 6.11, se desarrolló una caracterización de las muestras con los resultados obtenidos en este trabajo con el objetivo de sintetizar los resultados y proveer una visión global y clara de las decisiones que se han ido tomando a lo largo de la tesis.

Partiendo de la columna agregados, la primera caracterización que se desarrolló fue la de neutralización de metales pesados (2da. Columna). En la tabla se muestran los resultados que arrojó el cemento como neutralizador del antimonio. Se eligió este metal para sintetizar en la tabla ya que es un componente clave para la función del TBBPA durante la vida útil del aparato que actúa como sinérgico y, porque en la bibliografía estudiada, fue este el metal cuya lixiviación no había sido analizada hasta el momento.

Analizando este comportamiento, se establece la primera determinación de que el cemento neutraliza correctamente al Sb por lo que el APR funcionaría eficientemente para controlar este contaminante.

Tabla 6. 12: Síntesis del desempeño de las probetas estudiadas.

	<b>Agregado</b>	<b>Neutralización de Sb (ppm)</b>	<b>Neutralización de TBBPA (ppm)</b>	<b>Conductividad térmica (W/m. K)</b>	<b>Resistencia a la compresión (MPa)</b>	<b>Resistencia a la flexión (MPa)</b>	<b>Capacidad de Succión capilar (g/m<sup>2</sup>)</b>
1	Arena	-	-	0,51	6,8 ± 0,6	0,6 ± 0,1	6177,8
2	FPR#3	23,6 ± 0,5	4,4 ± 0,1	0,28	2,6 ± 0,2	0,6 ± 0,1	17500
3	FPR#3@CPF	6,0 ± 0,3	17,7 ± 0,7	-	4,9 ± 0,2	2,0 ± 0,1	-
4	FPR#3@CPF:AR	-	-	-	3,9 ± 0,3	-	-
5	FPR#3@CPF:CA	-	<LOQ	-	2,4 ± 0,4	1,9 ± 0,4	-
6	FPR#8	-	-	-	2,2 ± 0,4	0,6 ± 0,7	-
7	FPR#3@MC	-	-	-	4,4 ± 0,3	1,1 ± 0,1	17750
8	FPR#8@MC	-	-	0,48	4,4 ± 0,3	1,4 ± 0,4	-
9	FPR#3@MC:CA/061	-	≤LOD	0,44	-	-	-
10	FPR#3@MC:CA/CU	-	≤LOD	0,38	3,2 ± 0,1	1,1 ± 0,1	22875
11	FPR#8@MC:CA/CU	-	-	-	4,9 ± 0,4	1,6 ± 0,1	19313
12	FPR#3@MC:CA/MMF	-	≤LOD	0,41	-	-	-
13	FPR#3@MC:CA/CB	-	≤LOD	0,47	-	-	-

Partiendo de que la partícula de APR debe ser recubierta con cemento de manera excluyente debido al lixiviado de metales, luego de observar coloraciones amarillentas en las muestras y en las aguas de curado, se procedió a estudiar diferentes aditivos que tengan la capacidad de neutralizar componentes orgánicos como el TBBPA. En este sentido se definió que el carbón activado comercial en cualquiera de las marcas analizadas, en un porcentaje de 1,1% de adición es suficiente para neutralizar dicho compuesto, dejando de lado a la bentonita que arrojó un menor desempeño.

Durante los análisis de tamaño, forma y granulometría se determinó que el tamaño 3 mm de partícula era la más similar los parámetros de la arena natural.

Cuando tocó analizar la conductividad térmica se encontró que, dentro de todas las muestras con carbón activado, la que contenía carbón marca CAE Ultra, fue la que arrojó un mejor desempeño, lo que fue atribuido a sus propiedades físicas.

Respecto a las propiedades mecánicas, ya se había estudiado en bibliografía que estos tipos de agregados no llegaban a alcanzar propiedades mecánicas aptas para mampuestos estructurales por lo que se esperó mantener las mismas, suficientes para mampostería o rellenos. En este sentido, se priorizó el efecto positivo del carbón activado para neutralizar contaminantes frente a su interferencia en el fraguado del cemento que disminuía levemente sus propiedades de resistencia a compresión y flexión. También se definió que, más allá que el cemento de albañilería disminuyera levemente las propiedades mecánicas, este sería apropiado para cumplir con el criterio de viabilidad técnica y económica.

Finalmente, en la tabla se muestran los resultados de capacidad de succión capilar debido a que, representa la mayor diferencia con los mampuestos de arena por la naturaleza hidrófoba del plástico que modifica la estructura interna de la probeta.

## CAPITULO 7. COMPONENTES CONSTRUCTIVOS CON APR

Aquí se desarrollan propuestas de componentes constructivos de cemento fabricados con APR como agregado en reemplazo del agregado natural. Primeramente, se presenta la propuesta de maquinaria para producir el componente y el *layout* de la planta productora. Seguidamente, el diseño, la caracterización y formulación de ladrillos, blocks y pre moldeados.

## 7.1. Producción del APR

En este capítulo se detalla una propuesta desarrollada y publicada en un capítulo de libro escrito entre la tesis y grupo de trabajo. El trabajo consiste en el diseño de proceso productivo basándose en las instalaciones del CEVE y la maquinaria con la que cuenta la institución. En la actualidad el APR se produce en la planta productora del CEVE, pero el material plástico, como se explicó en el Capítulo 5 es triturado por la empresa de reciclaje. La propuesta en este capítulo es la de una planta piloto que combina las etapas de trituración y encapado para fabricar los APR a nivel industrial. El proceso se compone por diferentes etapas que, luego de ser completadas permiten obtener un agregado listo para usar en la construcción.

### 7.1.1. Producción en planta piloto

La planta piloto para producir una muestra prototipo de APR se diseñó con el objetivo de procesar diariamente 100 kg de FPR. La misma se encuentra emplazada en las instalaciones del CEVE y la maquinaria para producirla es sencilla y asequible.

La producción del APR comienza con la recolección de FPR en los centros de gestión de RAEEs, luego con el material en la planta se desarrolla un primer triturado a un tamaño de partícula de 40-50 mm, y un segundo triturado a 3-4 mm con un molino triturador. Una vez obtenidas las partículas en tamaño 3-4 mm, se las cubre con el *shell* (cemento Portland + adiciones). Para esto, la FPR debe colocarse primero en la máquina hormigonera modificada y humedecerse con agua. El material del “*Shell*” se agrega lentamente a las partículas de plástico mientras la máquina se mantiene en funcionamiento a una velocidad de giro de 30 rpm para lograr una cobertura uniforme.

Una vez cubiertas todas las partículas, se extraen de la máquina y se dejan reposar durante 24 horas en una superficie amplia y lisa. Al día siguiente, las partículas se tamizan para evitar aglomeraciones entre ellas con un tamiz de 4,8 mm.

Todo este procedimiento de recubrimiento de las partículas se realiza dos veces más hasta obtener un producto con 3 capas de *shell* (Figura 7.1). Finalmente, el producto se esparce en una superficie lisa y se introduce en agua de curado durante 14 días. Finalmente, luego de 28 días a temperatura ambiente, el APR obtenido está listo para ser utilizado.

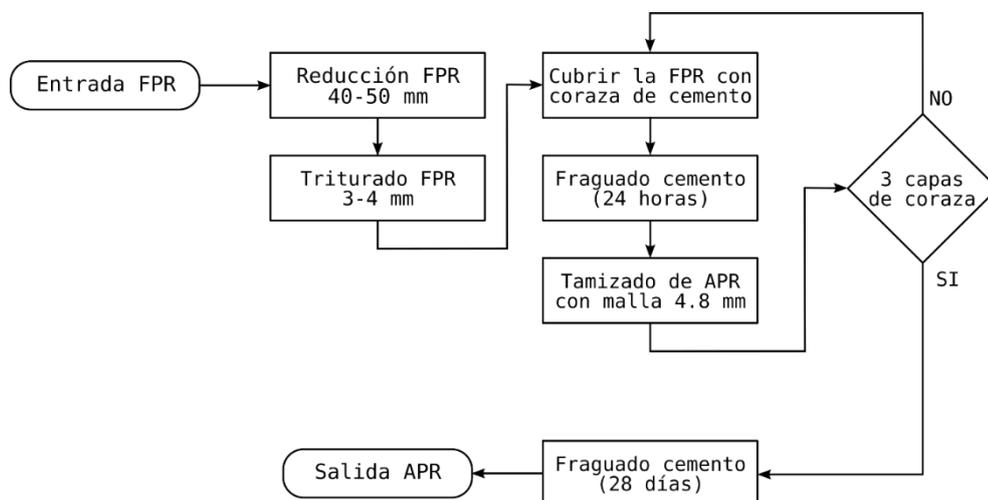


Figura 7. 1: diagrama de flujo de proceso productivo de APR.

### 7.1.2. Etapas del proceso y maquinaria necesaria

En la Tabla 7. 1 veremos cada etapa del proceso con sus respectivas maquinarias, tiempos, consumos energéticos y productividad. Cada uno de estos puntos será explicado en cada etapa.

Tabla 7. 1: etapas de proceso, tiempos y energía que consume cada máquina con su respectivo rendimiento.

Entrada	Etapas	Tiempo (h)	Energía (kWh)	Rendimiento (kg/h)	Rendimiento (Kg/Mj)
1	Trituración 1	8	44	13	0,6
2	Trituración 2	4	14,8	25	1,9
3	Mezclado (1ra capa)	1	2,19	100	12,7
4	Fraguado	16	0	6	-
5	Tamizado	1	0	33	-
6	Mezclado (2da capa)	1	2,19	100	12,7
7	Fraguado	16	0	6	-
8	Tamizado	1	0	33	-
9	Mezclado (3ra capa)	1	2,19	100	12,7
10	Fraguado	16	0	6	-
11	Tamizado	1	0	33	-
12	Curado	336	0	-	-

#### 7.1.2.1. Trituración

Como dijimos, el primer paso en una planta piloto para procesar la FPR es reducir el tamaño de las carcasas de plástico. Para ello, se propone utilizar una trituradora de discos de 5,5 kW. Vemos, en la Tabla 7. 1 que la trituradora convierte una carcasa de plástico en partículas de 40-50 mm en una velocidad de 13 kg por hora, por lo tanto, para procesar 100 kg de plástico se requiere de aproximadamente 8 horas. Además, el consumo de energía en este tiempo es de 44 kWh.

Seguidamente, las partículas vuelven a triturarse a un tamaño de 3-4 mm. Para ello se emplea el molino de cuchillas de 3,7 kW (Figura 7.2). Esta máquina convierte un plástico de 40-50 mm de tamaño en partículas de 3-4 mm a una velocidad de 25 kg por hora, por lo que para procesar 100 kg de plástico se necesitan 4 horas, y el consumo de energía en este tiempo es de 14,8 kWh.



*Figura 7. 2: trituradora de discos y un molino de cuchillas. Ambas necesarias para reducir el tamaño de las carcasas plásticas a 3-4 mm.*

#### *7.1.2.2. Mezclado*

El recubrimiento de la FPR con una mezcla de cemento y adiciones es un paso clave en este proceso. Para desarrollar este paso a escala productiva, se propone emplear una hormigonera electromecánica estándar de 0,4 m<sup>3</sup> y 2,2 kW (Figura 7.3). Como se ve en la entrada 3 de la Tabla 7. 1, esta máquina recubre las partículas en una tasa de 100 kg por hora y el consumo de energía en una hora de producción es de 2,19 kWh.



*Figura 7. 3: mezcladora convencional utilizada en la etapa de mezclado y encapsulado.*

7.1.2.3. *Fraguado del cemento y tamizado*

Una vez conformada la cáscara (shell), el APR se coloca sobre el piso durante la noche. Al día siguiente, la carcasa habrá aumentado su resistencia mecánica por efecto del fraguado del cemento. Luego, se lleva a cabo el tamizado manualmente con una pala ancha. Esta etapa lleva mucho tiempo y es un trabajo intensivo en mano de obra, pero con un consumo de energía eléctrica igual a cero.



*Figura 7. 4: partículas de APR luego del tamizado.*

7.1.2.4. *Curado del APR*

Como vimos en la Figura 7.1 los pasos de mezclado, fraguado y tamizado deben repetirse dos veces más para producir un *shell* de tres capas. Después del tamizado final, el APR se almacena en una pila durante 14 días y se humedece diariamente para mantener un alto nivel de humedad (Figura 7.5)



*Figura 7. 5: Curado del APR en recipientes adecuados.*

7.1.3. Layout de la planta de producción piloto del APR

En este apartado se describe una propuesta planta piloto que incluye las etapas de trituración del material. En la actualidad, la producción del APR se desarrolla en la planta del CEVE descrita en el apartado anterior pero la trituración se desarrolla en la planta de reciclaje de donde proviene el material. El layout consiste en un plano en una vista superior en dos dimensiones a escala. En este caso se desarrolló el layout de la planta piloto de reciclaje FPR con una superficie total de 200 m<sup>2</sup>.

El flujo del material entra por el lado izquierdo y el primer proceso es el triturador de plásticos, (a la izquierda del plano) que requiere alrededor de 50 m<sup>2</sup>, debido al alto ruido producido por las máquinas trituradoras, esta zona podría estar insonorizada. A continuación, la zona de mezclado/encapado se propone linealmente hacia la parte posterior del establecimiento. El área necesaria para este paso es la más grande, de unos 100 m<sup>2</sup> debido a que las actividades de almacenamiento temporal y tamizado se realizan directamente en el piso. Antes de que el APR final salga de la planta piloto de reciclaje es saturado de agua por 14 días. El área para este paso está representada por una extensión de 50 m<sup>2</sup> dentro de la planta, sin embargo, el proceso de curado es posible hacerlo en el exterior.

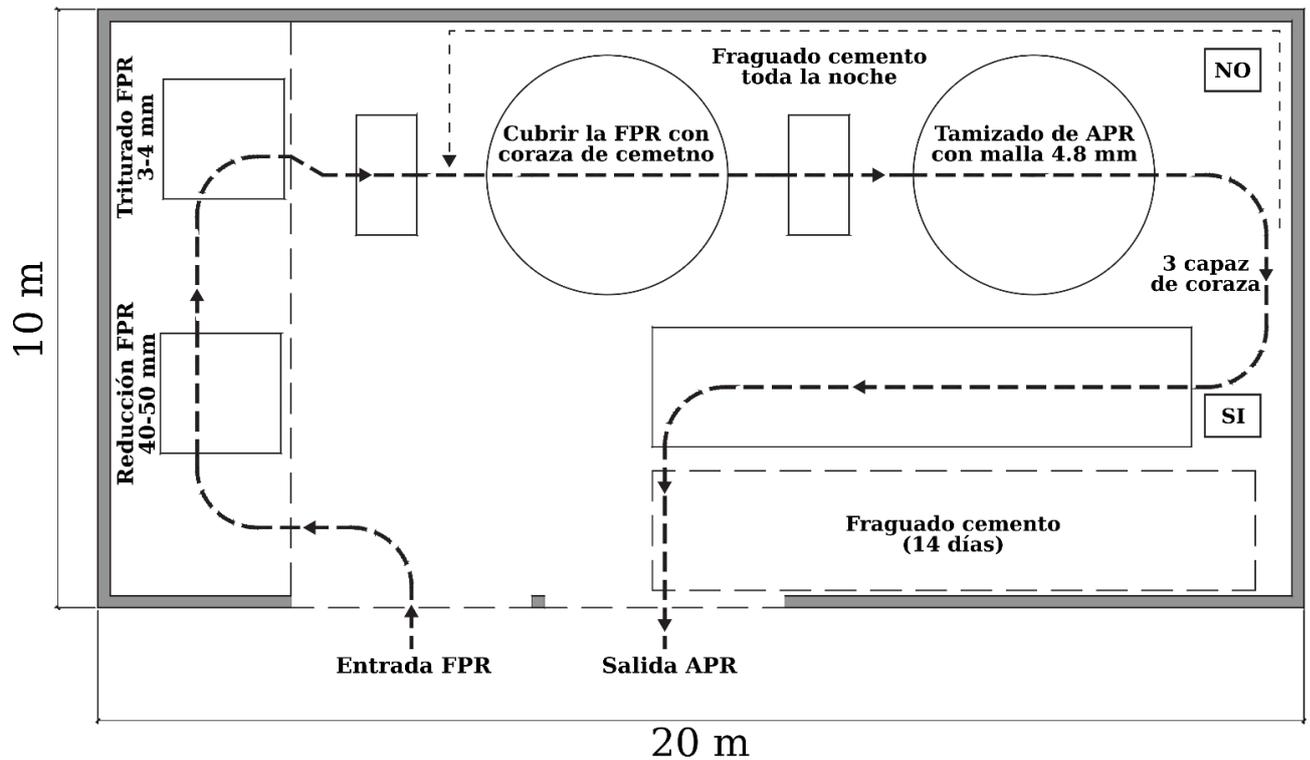


Figura 7. 6: layout de planta piloto para la producción de APR.

7.2. Componentes constructivos

Como se determinó en el capítulo 6, el material es apto para ser aplicado en ladrillos no portantes para mampostería y otros componentes no estructurales como placas aislantes. El reglamento CIRSOC 501 [212] presenta tres categorías para ladrillos de construcción: ladrillo sólido cerámico, bloque hueco cerámico y bloque hueco de hormigón. Las tres categorías se clasifican de acuerdo a sus propiedades mecánicas y físicas; la resistencia a la compresión debe ser mayor de 5.0 MPa para el ladrillo macizo

cerámico y mayor de 13.0 MPa para los bloques huecos cerámicos y de hormigón (según la norma IRAM 12566-1 [217]). La granulometría de agregado fino debe ser inferior a 3 mm, y la relación de volumen de agregado fino a cemento/cal debe ser de alrededor de 2,25 - 3 , según el reglamento CIRSOC 201 [184](2005).

A parte de cumplir con lo reglamentado en CIRSOC, para que el uso de un material o sistema de construcción no tradicional sea legal en Argentina, es necesario obtener el Certificado de Aptitud Técnica (CAT), el cual es otorgado por la Secretaría de Hábitat, dependiente del Ministerio de Desarrollo Territorial y Hábitat del Gobierno Nacional. Obteniendo este certificado, será posible a futuro poder atravesar las barreras de la investigación y aplicar de manera directa los CC desarrollados con APR en construcciones civiles reales y funcionales. La perspectiva a futuro, al igual que lo que fue proyectado y logrado con los ladrillos de PET [147] es transferir el *know-how* tecnológico a cooperativas locales o pequeñas empresas para la aplicación en la construcción de viviendas. Así, conceptos como “Autoconstrucción” y “Economía Circular” serán aplicados de manera directa para satisfacer necesidades de vivienda y trabajo y aportar a las soluciones tendientes a reducir el Calentamiento Global.

En los siguientes apartados se desarrollan las diferentes propuestas de CC. El ladrillo fue caracterizado en resistencia mecánica y sus resultados se exponen en el texto. Los demás componentes son propuestas que no han sido caracterizadas dentro del marco de esta tesis. De todas maneras, todos los mampuestos y construcción de prototipo fueron construidos durante el proceso de esta tesis por los trabajadores del CEVE en su planta, bajo supervisión de la doctoranda.

#### 7.2.1. Ladrillos

Los ladrillos del tipo cerámico pueden ser macizos o bloques huecos portantes. En el Reglamento Argentino de Estructuras de Mampostería [142] se define al ladrillo cerámico macizo como “aquellos mampuestos cuya sección según cualquier plano paralelo a la superficie de asiento tenga un área neta no menor que el 80 % del área bruta correspondiente, no presenten agujeros cuyas secciones transversales según el mismo plano tengan un área individual mayor que el 4 % del área bruta, y los espesores de sus paredes sean mayores o iguales que 25 mm”.

Para esta investigación, se desarrolló un ladrillo macizo en las instalaciones del CEVE siguiendo los pasos descritos en la Figura 7.7. El ladrillo fue fabricado respetando las dimensiones del ladrillo tradicional cerámico empleado en Argentina, (25,0 x 12,5 x 5,5 cm). La mezcla se preparó utilizando un mortero con el agregado de APR FPR#3@MC:CA/CU-1, debido a que, el porcentaje del 1,1% de CA es el mínimo necesario para estabilizar eficazmente el TBBPA, así mismo el MC reemplaza la mezcla de CPF por ser este un material comercialmente disponible y con propiedades mecánicas acordes al objetivo. Se mantuvo una relación de volumen APR: cemento de 1:6.

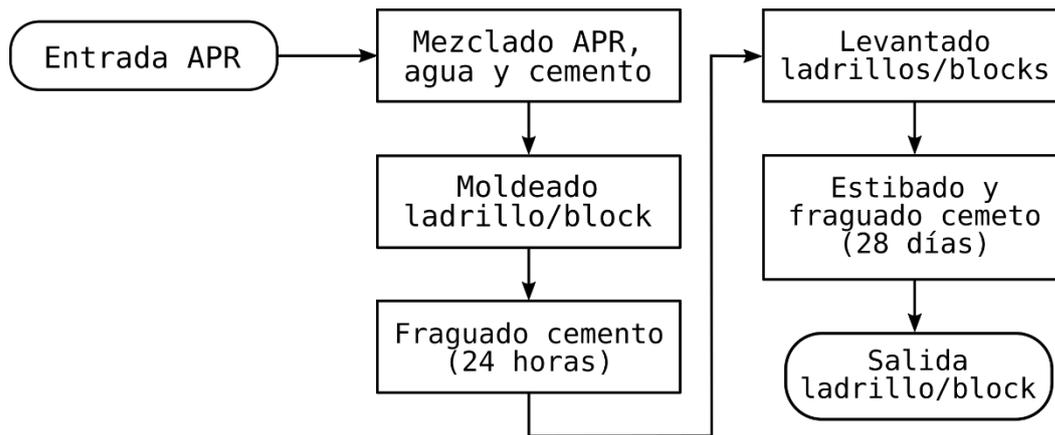


Figura 7. 7: diagrama de flujo de la producción de ladrillos con mortero de APR.

En las Figuras 7.8 se muestran fotografías del ladrillo producido en el CEVE.

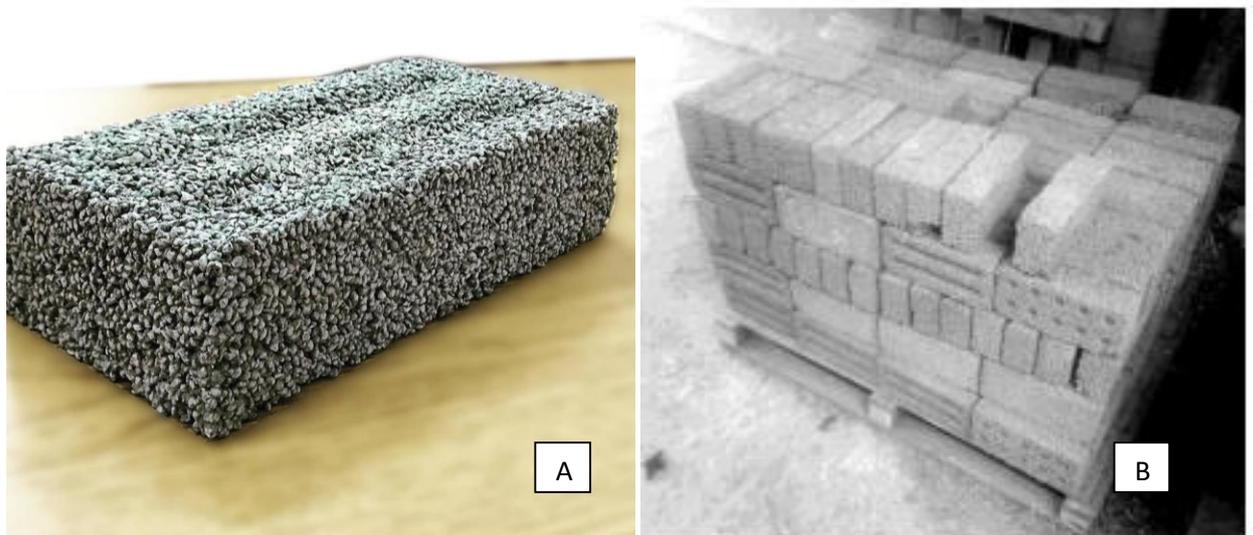


Figura 7. 8: : a - b: a- ladrillo macizo de APR. b- pallet con producción en masa del ladrillo de APR.

Como se destacó en capítulos anteriores, debido a que el agregado utilizado tiene un núcleo de plástico, el ladrillo resultante será más ligero y tendrá mejores propiedades de aislamiento térmico que los ladrillos de arcilla cocida convencionales.

#### 7.2.1.1. Propiedades mecánicas

Los ladrillos de APR arrojaron una densidad de  $960 \text{ kg/m}^3$  y una conductividad térmica de  $0,332 \text{ W/K m}$ , lo que responde a los criterios de aislamiento térmico planteados al inicio de la investigación. La resistencia a la compresión fue calculada bajo los lineamientos de la norma IRAM 12586 [255] obteniendo una resistencia media de  $4,2 \pm 0,4 \text{ MPa}$ .



*Figura 7. 9: ensayo de resistencia a la compresión en ladrillos de APR.*

En función de la resistencia a la compresión obtenida, el ladrillo de APR, tal como había sido determinado en el Capítulo 6, constituye una alternativa factible para la mampostería con requisitos de rendimiento no portante. Un prototipo de pared de ladrillos de APR construida en las instalaciones del CEVE que formó parte de este trabajo de tesis se muestra en la Figura 7.10. Esta pared fue la primera levantada de un prototipo de casa construida utilizando el ladrillo de APR en las instalaciones del CEVE y que constituyó uno de los elementos principales de este trabajo de tesis ya que constituye un modelo real para evaluar al componente en condiciones reales de uso.



*Figura 7. 10: pared en construcción de ladrillos de APR .*

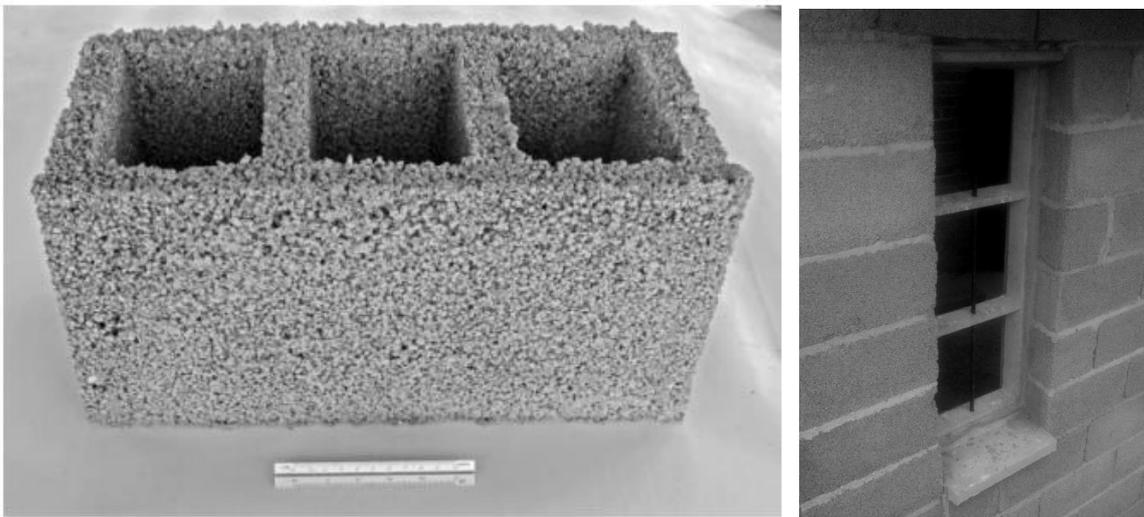
Los componentes constructivos que se desarrollan a continuación forman parte de diferentes experiencias que fue realizando la tesista junto al equipo y con el apoyo de los trabajadores del CEVE. Estos componentes, en conjunto fueron incorporados en el prototipo de vivienda que se mencionó anteriormente y constituye un elemento de evaluación continua al día de hoy.

### 7.2.2. Ladrillos huecos

Para los ladrillos huecos se usó el mismo APR de los ladrillos convencionales, FPR#3@MC:CA/CU-1. El diseño y la morfología de este bloque se realizó considerando el bloque hueco de hormigón estándar (Figura 7.11) con dimensiones de 19 x 39 x 19 cm, con una matriz de tres cavidades, según la norma IRAM 11561-1 [256]. La fabricación se realizó mediante compactación y vibración.

### 7.2.3. Marco estructural para ventanas

Se presenta una tercera opción de CC, un marco de ventana estructural de hormigón prefabricado. En este caso, el agregado empleado para su fabricación fue APR de dos tamaños de partícula medio diferentes, 3 mm y 8 mm, debido a la necesidad de un agregado fino y grueso. La proporción de volumen utilizada fue de 3:1:1 (FPR#8@MC/CU-1: FPR#3@MC/CU-1: CPF). Además, la mezcla de cemento matriz se reforzó con barras de acero (4,2 mm). El ancho de esta ventana es de 40 cm y la altura puede ser variable según la necesidad. En la Figura 7.12 se puede ver la ventana terminada.



*Figura 7. 11: bloque hueco estándar hecho con APR. Figura 7. 12: ventana con marco de hormigón con agregado de APR*

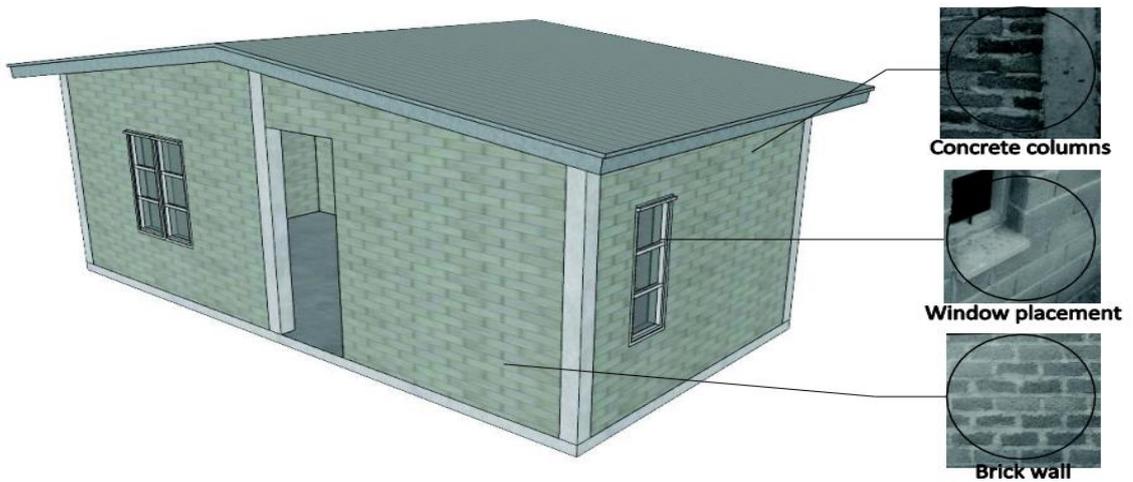
## 7.3. Vivienda prototipo

Luego de definir características y propiedades de las dos tipologías de ladrillos producidas, se construyó un pequeño prototipo de acuerdo con un diseño de vivienda anteriormente utilizado por el CEVE con ladrillos de PET. Las dimensiones de este prototipo son de 3 x 6 m, que representan una pequeña oficina de 18 metros cuadrados (ver Figura 7. 13).

El diseño de la vivienda consta de un comedor y un dormitorio con un pequeño balcón. Este diseño también se utiliza como medida productiva, ya que representa la cantidad de ladrillos que se pueden producir con el APR que se obtiene en un período determinado. Para este caso de estudio, se emplearon alrededor de 2000 ladrillos idénticos a los descritos en el apartado 7.2.1 y 100 bloques de mortero APR de los presentados en el apartado 7.2.2. Para producir el APR para formar esta cantidad de ladrillos es necesario procesar 1400 kg de FPR.

Como se ve en las imágenes de la Figura 7. 14 de la construcción del prototipo, se aplicaron diferentes técnicas tradicionales de mampostería para evaluar el rendimiento de los componentes, que consisten

en la construcción de paredes, relleno de columnas de hormigón e instalación de ventanas. Los resultados del análisis mostraron que las técnicas de albañilería se llevaron a cabo positivamente y no se encontraron obstáculos a considerar.



*Figura 7. 13: modelo vivienda prototipo fabricada con ladrillos de APR.*



*Figura 7. 14: construcción de paredes dentro de la vivienda empleando diferentes técnicas y con ladrillos de APR.*

#### 7.4 Conclusiones del capítulo

Luego de definir las propiedades mecánicas del APR, se procedió a elaborar y caracterizar componentes constructivos incorporando el agregado. Se desarrolló un ladrillo de medidas convencionales que resultó apto para muros no portantes, con propiedades de aislación térmica y fue aplicado en la vivienda prototipo teniendo en cuenta las demás propiedades mecánicas y de durabilidad definidas en el Capítulo 6 junto a otros componentes desarrollados como ladrillos huecos y marcos de ventanas.

La vivienda y sus elementos constructivos constituyen el producto final de esta tesis y seguirá funcionando como modelo de análisis en la realidad para las futuras investigaciones del grupo de trabajo. Con esta construcción podrán medirse resistencia a agentes climáticos, al paso del tiempo, a la radiación, durabilidad y al mismo tiempo será material de análisis para posibles intervenciones que podrían hacerse durante su uso e incluso fin de vida.

Al momento, y para cumplir con los objetivos de esta tesis, la posibilidad de haber podido incorporar el material en una construcción a escala real, resulta altamente positiva y satisfactoria.

## CAPITULO 8. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

En este capítulo se desarrolla un análisis de ciclo de vida preliminar del proceso productivo del APR que busca determinar si efectivamente el mismo constituye una alternativa viable a nivel ambiental. En el apartado 8.1 se presentan las bases teóricas de una Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y luego, en el apartado 8.2 se desarrolla el estudio realizado sobre la producción de APR. Se describen materiales, métodos, discusión y elegibilidad del APR frente a otros agregados y otros manejos del residuo.

## 8.1 El análisis de Ciclo de Vida

Existe hoy en día una preocupación y conciencia generalizada sobre lo que el cambio climático (CC) está provocando en el planeta. Alteración en los patrones de precipitaciones, extinción de especies, cambio en los rendimientos de las cosechas, escasez hídrica, aumento del nivel de los océanos, etc., son algunos de los efectos negativos que se están produciendo en la actualidad y seguirán en aumento de no tomar medidas urgentes y efectivas para, por lo menos, detenerlo. En este sentido, a nivel mundial se han ido desarrollando metodologías y estrategias con el objetivo de aunar objetivos y esfuerzos que respondan a dichas problemáticas.

Una de las técnicas desarrolladas a nivel mundial es el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) o Life Cycle Analysis (LCA) en inglés. El ACV es un estudio que permite investigar, cuantificar y evaluar los impactos ambientales de un producto o servicio durante todo su ciclo de vida (Figura 8. 1). Los impactos cuantificados son los relacionados al consumo de recursos para fabricar el producto y a las emisiones que se generan tanto para fabricarlo como durante el uso [257].



Figura 8. 1: ciclo de vida de un producto [286]

El ACV entonces permite identificar cuáles pasos del procesamiento del producto o servicio generan más daños y aplicar posibles mejoras dentro de la misma, considerando todos los atributos ambientales relacionados con la naturaleza, la salud humana y los recursos, con una óptica distinta. Las etapas principales dentro del Ciclo de Vida de un producto o servicio son:

- La fabricación: que tiene en cuenta la extracción de las materias primas del ambiente, el procesamiento, el transporte, la elaboración de un producto, la distribución al mercado.
- La utilización y el mantenimiento: que tiene en cuenta no sólo el tiempo y tipo de uso que se le da al producto, sino que también los repuestos, procedimientos, o *services* que se puedan aplicar al mismo durante el uso.

- El desmantelamiento y el tratamiento de los residuos al final de la vida útil: que puede incluir el reciclaje de los materiales, su utilización en otros procesos industriales, el aprovechamiento del calor resultante de la incineración de sus materiales, su disposición final en vertederos, etc.

Debido a la complejidad del estudio, y la necesidad de obtener resultados objetivos, se han desarrollado normas internacionales que se aplican a la hora de desarrollar un ACV. Con ellas se ha logrado estandarizar la metodología. La *International Standard Organization (ISO)* desarrolló una serie de normas para lograr dicha estandarización.

La norma IRAM-ISO 14040 “Gestión Ambiental - Análisis de Ciclo de Vida - Marco de Referencia” [258] establece los principios y el marco general y define al Análisis de Ciclo de Vida (ACV) como “*una técnica para evaluar los aspectos medioambientales y los potenciales impactos asociados con un producto, proceso o actividad mediante la recolección de un inventario de las entradas y salidas relevantes de un sistema, la evaluación de los potenciales impactos medioambientales asociados con esas entradas y salidas; y la interpretación de los resultados de las fases de análisis y evaluación de impacto de acuerdo con los objetivos del estudio*”, y define “ciclo de vida” como las etapas consecutivas e interrelacionadas de un sistema del producto, desde la adquisición de materia prima o de su generación a partir de recursos naturales hasta la disposición final.

La norma IRAM-ISO 14044 “Gestión Ambiental- Análisis de Ciclo de Vida - Requisitos y Directrices” ([128] establece la metodología, requisitos y líneas guía para desarrollar el ACV. En la Argentina, el Instituto Argentino de Normalización y Certificación (originalmente Instituto de Racionalización Argentino de Materiales: IRAM) colabora en la elaboración de estas normas, participando en las actividades del Comité Técnico 207 de ISO, en el Sub-Comité 5.

La SETAC (*Society of Environmental Toxicology and Chemistry*) lo define como “*un proceso objetivo que evalúa las cargas medioambientales asociadas con el proceso de un producto o una actividad a través de la identificación de energías y los materiales utilizados, así como los residuos liberados al medio ambiente y que evalúa e implementa oportunidades para la introducción de mejoras medioambientales*”.

En este capítulo el objeto es el de determinar si efectivamente la producción de APR constituye una solución efectiva y sustentable frente al desecho de plásticos de RAEEs en primer lugar y luego si el producto APR constituye una alternativa superior, equivalente o inferior a otros agregados para morteros. Muchas veces, determinadas soluciones constructivas se consideran ecológicas por emplear recursos renovables o disminuir residuos, sin embargo, cuando son analizadas desde otros enfoques, considerando los daños que puede llegar a provocar cada etapa de su procesamiento, estas soluciones resultan no sustentables.

#### 8.1.1. Metodología

De acuerdo a la norma ISO 14040 [258] un ACV debe estar dividido en cuatro partes esenciales, las relaciones entre ellas pueden verse graficadas en la Figura 8. 2.

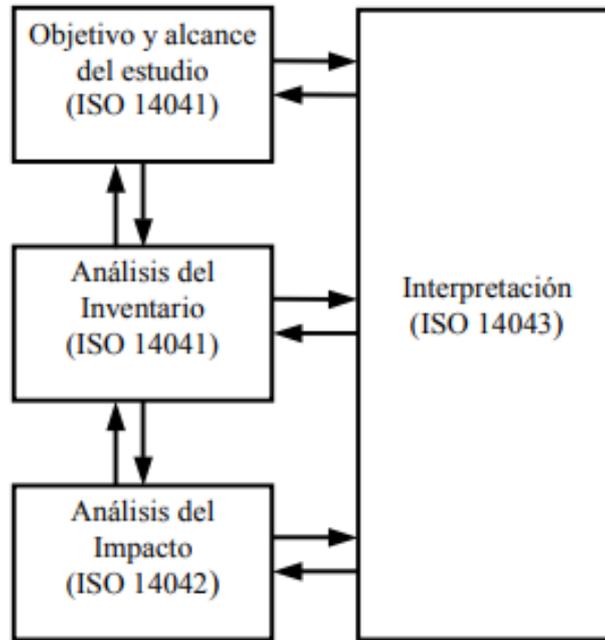


Figura 8. 2: fases del ACV en IRAM-ISO 14040 [287].

La norma IRAM-ISO 14040 establece que para desarrollar un ACV, deben aplicarse los requisitos de la norma IRAM-ISO 14044 [128]. La metodología del ACV es de carácter dinámico, es decir que estas cuatro etapas, como lo indican las flechas se interrelacionan, y a la vez es iterativo ya que a medida que se van obteniendo resultados se pueden modificar o mejorar los datos, hipótesis, objetivos. Por esto y por la complejidad a la hora de recopilar y analizar datos es que generalmente se usan programas informáticos para simplificar la tarea. Algunos de estos programas y los más conocidos en el ámbito científico son, por ejemplo; SimaPro, GaBi, Boustead Model, Umberto, etc. Existen también programas gratuitos y libres como LCA Open o el danés SBIDB, específico para el uso en construcción. Estos programas incluyen principalmente bases de datos, más o menos extensas según la calidad del software. También incluyen métodos de caracterización cuyo concepto será explicado más adelante.

### 8.1.2. Etapas de un ACV

A continuación, se describen las etapas metodológicas para la realización de un ACV.

#### 8.1.2.1. Objetivo y alcance del estudio

El objetivo del ACV o el ¿para qué se realiza el análisis? establece la aplicación prevista, las razones para realizar el estudio, el público previsto o las personas a quienes se desea comunicar los resultados. Por su parte, el alcance define la amplitud, profundidad o nivel de detalle con el que se analizará en el estudio mediante la definición de los límites del sistema, la unidad funcional, la calidad requerida de los datos, etc. En este primer punto se definen, el propósito del sistema, funciones, unidad funcional, cuyo concepto será desarrollado más adelante, alcance, entre otros.

En un ACV deben considerarse todos los flujos de materiales y de energía para elaborar un producto o prestar un servicio, y todos los flujos residuales que puedan aparecer, considerando todas las fases de su ciclo de vida (Figura 8. 1).

Los flujos de materia y de energía que son incluidos en el inventario deben cumplir las siguientes condiciones:

- Los flujos de entrada al sistema deben ser considerados en la forma en la que se encuentran en el ambiente natural, sin previa modificación humana.
- Los flujos de salida serán aquellos que irán a formar parte del ambiente exterior al sistema considerado, sin sufrir transformaciones posteriores por parte del hombre.

Toda industria tiene proveedores, que elaboran insumos en sus propias fábricas, que a su vez tienen otros proveedores. Por otra parte, en la fabricación de casi cualquier producto, por ejemplo, ladrillos, hace falta una o varias formas de energía en alguno o varios puntos de su cadena productiva. Pero la energía es obtenida en otro sistema industrial, muy ajeno al fabricante de ladrillos, quien no tiene ninguna información sobre cuáles son los impactos que produce. Puede producirse a partir de combustibles fósiles, del caudal de un río o de otra fuente renovable de energía (radiación solar, viento, biomasa). A su vez, la propia central eléctrica estará construida con distintos materiales, que son elaborados en otros sistemas productivos, que a su vez consumen electricidad [257]. En otras palabras, es necesario conocer todos los procesos relacionados con el objeto de estudio que aparecen “aguas arriba” y también tener muy en cuenta los procesos que aparecen “aguas abajo” es decir el tratamiento que recibirán los flujos residuales. Tendrán distinto impacto según cuál sea su tratamiento: incineración con recuperación de energía, reciclado, recuperación de materiales, disposición controlada, etc.

Para poder “controlar” todos los factores que intervienen en el proceso y seleccionar cuales son los que se tendrán en cuenta para desarrollar el análisis es que se establecen los “límites del sistema”.

Los límites del sistema permiten modificar el alcance del análisis según el objeto de estudio. Cuando sólo se consideran los impactos asociados desde la obtención de la materia prima y la energía requeridas para la elaboración del producto hasta que este se encuentra en la planta listo para ingresar en el mercado, el estudio es conocido como “de la cuna a la puerta” (límites indicados con línea negra continua en la Figura 8. 3). Esto puede ampliarse para incluir alguna etapa posterior, por ejemplo, el transporte hasta un centro de distribución (límites indicados con línea de trazos en la Figura 8. 3). Si, en cambio, se incluyen únicamente los procesos que intervienen dentro de los límites del sistema producto, el estudio se denomina “de la puerta a la puerta” (límites indicados con línea de puntos en la Figura 8. 3)

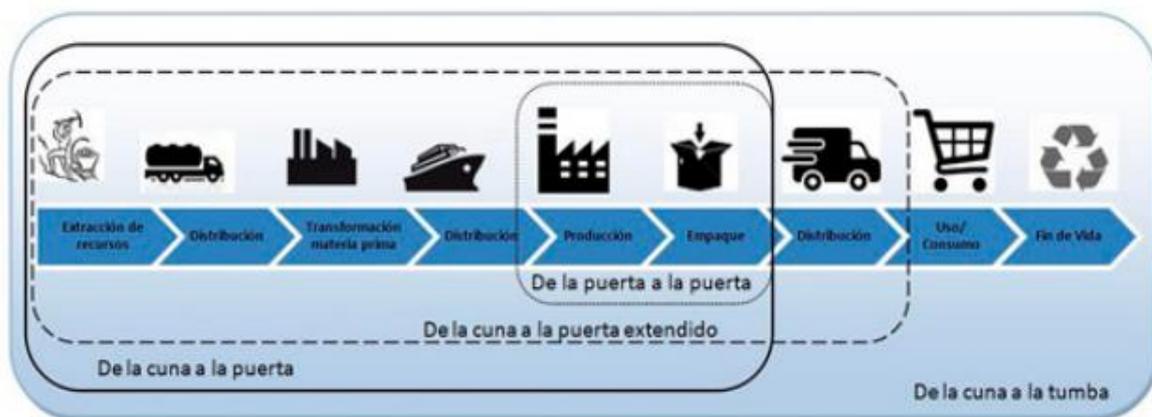


Figura 8. 3: diferentes formas de limitar un sistema para analizar un producto o servicio según el objeto de estudio.

### 8.1.2.2 *Definición de la Unidad Funcional*

La norma IRAM-ISO 14040 [258] determina que un mismo sistema puede tener varias funciones posibles y que la seleccionada para el estudio dependerá del objetivo y alcance del ACV.

Una característica distintiva del ACV es que relaciona el impacto sobre el ambiente con la función del producto analizado. Por ello, el punto central no es el producto en términos físicos, sino el servicio o función que este ejerce y el que se debe evaluar el impacto producido. Una vez elegida la función, se selecciona la unidad funcional (UF) es decir, la cuantificación del servicio suministrado por el sistema, la unidad común que representa la función del sistema. Los resultados de los cálculos de un ACV se refieren siempre a la UF. Por lo tanto, esta debe ser un valor cuantificable y aditivo.

### *Análisis de inventario*

El Inventario de Ciclo de Vida (ICV) es definido por la IRAM-ISO 14040 como la "recopilación y cuantificación de entradas y salidas para un sistema-producto a lo largo de su ciclo de vida". Durante esta fase se calculan los requerimientos energéticos y materiales del sistema y la eficiencia energética de los distintos componentes.

La confección del ICV está constituido por los siguientes pasos:

- Construcción del diagrama de flujo del sistema.
- Determinación de procesos unitarios del sistema del producto.
- Recolección inicial de datos para cada proceso unitario.
- Aplicación de reglas de decisión o de corte.
- Asignación de cargas.

### 8.1.3 *Construcción del diagrama de flujo del sistema*

Un diagrama de flujo de referencia es una representación gráfica de las relaciones entre los procesos involucrados y los flujos de materia y energía incluidos en el estudio de ciclo de vida. Lo importante es que resulten claras las relaciones entre los procesos y los flujos materiales y energéticos involucrados. Un ejemplo de esto se muestra en la Figura 8. 4[259].

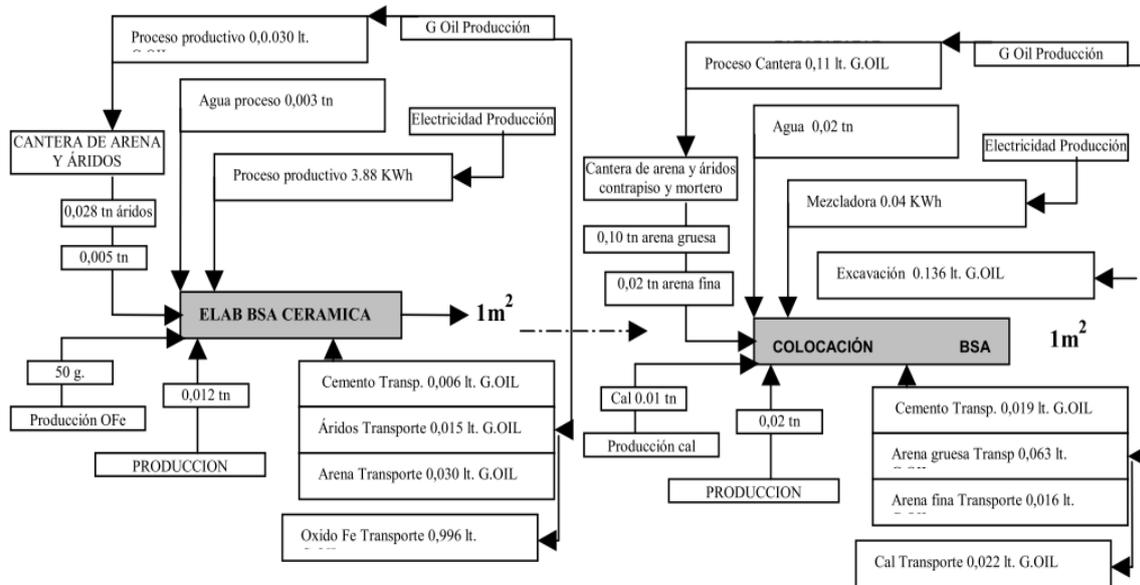


Figura 8. 4: diagrama general del ciclo de vida de fabricación y colocación de baldosa cerámica.

### 8.1.3.1 Análisis de impacto

Denominada en la Norma IRAM-ISO 14040 [258] como Evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV), en esta fase, el propósito es evaluar cuán significativos son los impactos ambientales potenciales según los resultados del inventario. El mismo consiste en una gran cantidad de datos, que, por lo general, son ordenados en una tabla.

La EICV es un proceso que se desarrolla para caracterizar y estimar los efectos de los resultados del inventario, donde se evalúan las modificaciones ambientales y los consumos de recursos producidos. Implica la asociación de los datos del inventario con las categorías de impactos ambientales específicos y con los indicadores de estas categorías, para entender estos impactos.

En general, se habla de “impactos potenciales”, ya que durante el inventario se realiza una agregación de los valores de emisiones de las distintas sustancias que han sido producidas en las distintas fases y componentes del sistema.

Según la norma IRAM-ISO 14040, la fase de evaluación de impactos consta de los siguientes elementos obligatorios:

- Definición de categorías de impacto: En este paso, deben definirse las categorías de impacto que se considerarán en el estudio, indicadores de categoría y modelos de caracterización.
- Clasificación: La clasificación consiste en asignar los resultados del inventario a las categorías de impacto identificadas. Durante la clasificación se condensan los resultados del ICV en un número limitado de aspectos ambientales estudiados, lo que permite realizar una primera interpretación del ACV. En la siguiente tabla (Tabla 8. 1) se detallan las categorías de impacto que más se utilizan en la mayoría de los ACV con su traducción al inglés ya que es el idioma en que están determinadas sus abreviaturas las cuales se escriben luego de su nomenclatura.
- Caracterización: la caracterización consiste en el cálculo de los resultados de los indicadores de categoría, que son valores numéricos que se asignan a cada categoría de impacto, multiplicando el intercambio ambiental (flujo de entrada o salida en el inventario) por el factor que representa cuánto contribuye ese intercambio ambiental a un determinado impacto ambiental.
  - Existen, además, otros elementos excepcionales que pueden utilizarse dependiendo del objetivo del estudio:

- Normalización: es el cálculo de magnitudes de los indicadores relativos a valores de referencia.
- Agrupamiento: consiste en el ordenamiento de los indicadores.
- Ponderación: es la conversión y agregación de indicadores entre categorías de impacto. Análisis de calidad de los datos: estimación de la confiabilidad de los resultados de la fase de evaluación de impactos.

Tabla 8. 1: categorías de impacto más relevantes y sus definiciones.

<b>Categorías de impacto más utilizadas</b>	
<b>Consumo de los recursos /abiotic depletion of elements/abiotic depletion of fossil fuels: ADe - ADf</b>	Se entiende por recursos tanto a las materias primas como el consumo energético. También se hace una distinción entre los recursos renovables y los no renovables. Entre los primeros están el agua, el viento, la radiación solar y los recursos bióticos, mientras que entre los segundos se encuentran los recursos minerales y el uso de la tierra.
<b>Calentamiento global /Global warming: GW</b>	Es el aumento de la temperatura terrestre debido al aumento de la concentración de gases en la atmósfera, que son transparentes a las radiaciones incidentes del sol, pero no a las radiaciones emitidas por la Tierra (gases de efecto invernadero o GEI). Entre los GEI que aumentan el efecto invernadero natural de nuestro planeta se encuentran el dióxido de carbono, el vapor de agua, el metano, los óxidos de nitrógeno, el ozono troposférico y los fluorocarbonatos, cada uno con distinta potencia para producir este efecto.
<b>Adelgazamiento de la capa de ozono /Ozone layer depletion: ODP</b>	Algunos gases reaccionan con el ozono, formando un nuevo compuesto, liberando oxígeno y produciendo, en consecuencia, el agujero de la capa de ozono. Los principales gases responsables son los clorofluorocarbonos (CFC), compuestos atóxicos, no inflamables, con propiedades útiles de condensación, que en los años 80 fueron liberados en la atmósfera en enormes cantidades (1.000.000 t por año). Hoy están prohibidos; en 1987, unos 200 países firmaron el Protocolo en el que se prohíbe de forma masiva a los CFC y se sigue hasta el día de hoy con la búsqueda de alternativas.
<b>Smog fotoquímico y ozono troposférico/particulate matter: PM</b>	Los químicos presentes en el smog incluyen óxidos de nitrógeno, componentes orgánicos volátiles, ozono troposférico y nitrato peroxiacetílico. El componente más dañino del smog fotoquímico es el ozono troposférico, que se produce por reacción entre contaminantes, principalmente óxidos de nitrógeno e hidrocarburos, bajo el efecto de intensa radiación solar, degradándose los compuestos orgánicos que forman oxidantes fotoquímicos, de los cuales el más importante es el ozono. Este compuesto se forma en concentraciones apreciables en baja altura (troposfera). Su coloración amarilla se debe al NO <sub>2</sub> , que absorbe luz visible próximo al límite del violeta. El <i>fotosmog</i> es irritante para los ojos y las vías respiratorias aún en dosis muy pequeñas (0,1 ppm). En presencia de otros contaminantes atmosféricos (SO <sub>2</sub> , partículas de polvo) aumenta su toxicidad, pudiendo producir la muerte en altas concentraciones. Asimismo, puede ocasionar daños en plantas (disminuyendo su capacidad de fotosíntesis), en construcciones, monumentos y documentos.

---

<b>Acidificación / Acidification: A</b>	La emisión de gases que contengan dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno (SO <sub>2</sub> y NO <sub>x</sub> ) produce que las precipitaciones contengan formas de ácido sulfúrico y nítrico, dando lugar a lluvias más ácidas que la natural (pH 5 -6). Los principales responsables de estas emisiones son los procesos de combustión en centrales eléctricas, en industrias y en transporte, el procesamiento de metales, los sistemas de calefacción y los procesos que liberan amoníaco.
<b>Eutrofización / Eutrophization: E</b>	Se produce por la acumulación en exceso de abonos o nutrientes, tales como nitratos, fosfatos y potasio, en el medio acuático. Esto conduce a una proliferación de algas monocelulares (plancton) y plantas acuáticas superiores, que naturalmente tienen un crecimiento limitado por la disponibilidad de nutrientes. Consecuentemente, la biomasa se descompone, originando una disminución de la disponibilidad de oxígeno, que dificulta el desarrollo de otros organismos o, incluso, lo imposibilita (condiciones anaeróbicas). En general, los nutrientes que conducen a la aparición del fenómeno de eutrofización son producidos por actividades antrópicas, por ejemplo, por el mal manejo de fertilizantes agrícolas. Las consecuencias de este fenómeno son, entre otras: Malos olores por descomposición de la materia orgánica, interferencia en la navegación de lagos por la presencia de plantas, afectación de las actividades pesqueras locales, mortandad masiva de peces
<b>Toxicidad/Human carcinogenic toxicity – Human non carcinogenic toxicity: HTc - HTnc</b>	El impacto toxicológico depende de dos factores: el efecto de sustancias químicas o biológicas y la exposición a las mismas. El efecto potencial depende de la emisión real y del destino de las sustancias emitidas. La toxicidad humana se mide con el Potencial de toxicidad humana, que representa el volumen requerido para diluir una sustancia hasta que carezca de efecto tóxico. Se caracteriza mediante la concentración máxima permisible a partir de una metodología desarrollada por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA). Algunas sustancias ecotóxicas se agrupan en: metales pesados (Cd, Pb, Hg), compuestos orgánicos persistentes (dioxinas, furanos), hidrocarburos policíclicos aromáticos y otras sustancias orgánicas.
<b>Uso del suelo / Land use: LU</b>	El uso del suelo aparece en todos los posibles procesos, más o menos intensivo en algunos procesos que en otros. Algunos ejemplos de actividades de interés en este aspecto son: minería, procesos productivos, urbanización, transporte, tratamiento de residuos, entre otros. El impacto producido por un proceso sobre el suelo es diferente si en el ya existía un uso similar o si es un terreno virgen. Se distingue, entonces, entre impactos por transformación del suelo (cambia la calidad del suelo) y por ocupación del suelo (se mantiene la calidad durante un tiempo).
<b>Consumo de agua / Water depletion: WD</b>	El consumo de agua es un indicador geográfico explícito, que no sólo muestra los volúmenes de uso de agua y la contaminación, sino también las ubicaciones. Puede ser calculada para un proceso, un producto, un consumidor, un grupo de consumidores (por ejemplo, un municipio, una provincia, un estado o una nación), un productor (por ejemplo, un organismo público o una empresa privada). El uso del agua se mide en términos de volumen de agua consumida (evaporada o que no retorna) y/o contaminada por unidad de tiempo.

---

#### 8.1.2.2. Interpretación

Es la última fase, aquí los hallazgos realizados en las dos fases precedentes se combinan para establecer las conclusiones y recomendaciones del estudio, en modo coherente con los objetivos establecidos al inicio. Las etapas de esta fase son las siguientes:

- Identificación de aspectos significativos basados en los resultados del inventario, de la evaluación de impactos o de ambas.
- Conclusiones, recomendaciones y comunicación de los aspectos relevantes

### 8.2 Análisis de Ciclo de Vida de los APR

A continuación, se desarrolla un análisis de ciclo de vida para la producción de APR en el que se determinará si presenta un impacto positivo o negativo al ambiente. Al mismo tiempo, permitirá determinar qué categorías de impacto se ven más afectadas y cuáles son las etapas más problemáticas de todo el proceso. En relación a esto, se determinará mediante comparaciones con otros trabajos, si el APR resulta una alternativa viable ambientalmente frente a los agregados naturales y si el proceso de incorporación de plásticos de RAEE en componentes constructivos se torna también una buena alternativa frente a la incineración, el relleno sanitario o la producción de plásticos post-consumo.

Las emisiones de gases de efecto invernadero son producidas principalmente por las actividades humanas como por ejemplo los procesos industriales que transforman materias por medios químicos o físicos (por ejemplo, los altos hornos de la industria del hierro y el acero, el amoníaco y otros productos químicos fabricados a partir de combustibles fósiles utilizados como sustancia química intermedia y la industria del cemento son ejemplos notorios de procesos industriales que liberan cantidades significativas de CO<sub>2</sub>). Durante estos procesos puede producirse una gran variedad de gases de efecto invernadero, incluidos el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el metano (CH<sub>4</sub>), el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) entre otros.

La fabricación de cemento, por ejemplo, tiene importantes implicaciones ambientales, dado que es una actividad energéticamente intensiva, y este impacto ambiental “se incorpora” en los productos del sector edilicio que utilizan este componente. Durante la fabricación de una tonelada de cemento se producen la mayor cantidad de emisiones de gases y demás categorías durante el proceso de cocción del Clinker. Durante la etapa de envasado, cuando el cemento ya se encuentra listo para ser usado como materia prima, los impactos disminuyen significativamente [260].

#### 8.2.2 Antecedentes

Trabajos existentes de ACV analizan el reciclaje de plásticos (RR) como proceso necesario como primer paso para luego dar lugar diferentes procesos secundarios. Presentan valores muy diversos de, por ejemplo, emisiones de gases efecto invernadero. En la mayoría de los trabajos se elige la tonelada como UF y los procesos unitarios van desde desmantelado, separación manual o por densidad, clasificación, descontaminación con solventes, electrodiálisis, refinado de metales, entre otros [110], [261]–[263]. Dentro de la separación, los plásticos de RAEE se clasifican en fracción pesada, media y liviana [263] en la fracción pesada se encuentran los plásticos con aditivos, es decir polímeros más densos y con presencia de contaminantes; en la fracción media podemos encontrar específicamente a los poliestirenos y finalmente en la fracción liviana encontramos plásticos con menor densidad que el agua como, por ejemplo, polipropileno. Estas clasificaciones pueden desarrollarse con procesos de separación por

densidad y este tipo de procesos se desarrolla principalmente en Europa o Asia, en donde el acceso a las últimas tecnologías y procesos químicos especializados es moneda corriente y en donde también se ha dado relevancia a la metodología de ACV para evaluar alternativas de tratamiento. En estos procesos, más allá de la tecnología con la que cuenten se deben seguir leyes europeas específicas que regulan el manejo y exigen el desarrollo tanto, de sistemas seguros y eficientes de separación de materiales, recuperación de metales y eliminación de materiales peligrosos [264] como las características edilicias y de seguridad con las que debe contar una planta de manejo, las responsabilidades para cada uno de los actores, etc.

Algunos de los resultados a nivel internacional determinan que reciclar plásticos de RAEE (RR) presenta emisiones de gases de efecto invernadero que van desde los 68,53 kg de CO<sub>2</sub> eq. y 125, 15 kg de CO<sub>2</sub> eq. [262] dependiendo si el proceso analizado incluye o no la etapa de tratamiento del residuo a los 406,50 kg CO<sub>2</sub> eq. [261]. Wager y col. [110] por su parte posicionan el reciclaje y producción de plásticos pos consumo frente a la incineración y encuentra en ambos procesos mayores impactos para toxicidad y eutrofización que para calentamiento global, aunque para el caso de la incineración las categorías relacionadas a la toxicidad resultan aún mayores ya que se relacionan con la emisión directa de cobre, bromo y antimonio. El autor concluye que no es posible reciclar RAEEs sin causar daños ambientales pero que sin embargo, los impactos siguen siendo mucho menores que los de producir plástico virgen. Otros autores determinan que reciclar plásticos ahorra entre un 71% [265] y 79% [266] de las emisiones de GEI que habrían sido producidas durante la producción de los mismos con materias primas vírgenes (PPV). A la vez que se evita entre un 84-90% de consumo energético en comparación con la producción de material virgen [267]. Respecto al plástico desechado, en el artículo de Royer y col., [268] se arriba a la conclusión de que la producción de hidrocarburos puede continuar indefinidamente durante todo su ciclo de vida, generando mayores valores de emisión estando los plásticos expuestos a la luz solar que sumergidos. Las emisiones de gases de hidrocarburos son hasta 2 veces más altas para el caso del Metano (CH<sub>4</sub>) y hasta 76 veces más altas para el Etano (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) en el aire en comparación con el agua. Esto es debido a la acumulación de calor en los plásticos, producto de la luz solar y de las propias características del material, además de la falta de fluidos que facilitan la sedimentación de microorganismos, lo que genera superficies expuestas directamente a la radiación solar. Alston y col. [263], realizan una comparación entre diferentes procesos que pueden aplicarse o desarrollarse con el residuo como; pirolisis (recuperación de energía en ausencia de oxígeno), incineración y vertedero. Determina que la incineración constituye la práctica con mayor impacto debido a las altas emisiones de dióxido de carbono. Por su parte la pirolisis impacta también negativamente al cambio climático debido al alto consumo de combustibles. La eliminación en vertedero genera menores impacto en relación a las opciones anteriores para cambio climático pero su principal impacto resulta para ocupación de espacio. Otros autores estiman que el vertido de plásticos de RAEE (VP) emite unos 15.000 kg de CO<sub>2</sub> eq. anuales [269]. Estas emisiones pueden deberse también a diversos tipos de refrigerantes, propios de este tipo de aparatos. Sin embargo, las emisiones de efecto invernadero pueden provenir de fuentes diversas, por ejemplo de los combustibles fósiles empleados en las maquinarias para ser eliminados o reciclados [270]. Puede verse entonces una variedad amplia de resultados que dependen de los contextos propios de cada país, los escenarios de reciclaje, la tecnología con la que se cuenta, y respecto a la ACV propiamente dicho; las unidades funcionales elegidas, los alcances, las matrices energéticas, etc.

El manejo de la FPR presenta su propia realidad dentro del contexto argentino por lo que debe realizarse un análisis específico que contemple dicha situación y, los análisis dentro de contextos fuera del país deben ser tomados como referencia para establecer comparaciones cualitativas.

En Argentina de manera general, el proceso de reciclado de RAEEs consiste en las siguientes operaciones; una recolección a través de puntos verdes provistos por el municipio, gobierno u ONG, una separación manual en plantas de manejo y una recuperación de materiales como plásticos, metales ferrosos y no ferrosos, cobre y vidrios. Como ya se mencionó los metales o partes que contienen metal se exportan al mercado externo y, el vidrio se comercializa dentro del mercado interno. Los plásticos por su parte se trituran y se almacenan a la espera de una posible comercialización para ser re extruidos y aprovechados como materia prima de otros procesos o bien donaciones para instituciones que lo reutilicen en otros productos sin mayores procesamientos o si no, finalmente los plásticos terminan en basurales a cielo abierto, rellenos sanitarios o son incinerados. [20][271].

Como en este trabajo se propone un agregado de plástico reciclado como reemplazo del agregado natural proveniente de canteras, las comparaciones apuntarán a determinar si efectivamente el APR constituye una alternativa sustentable frente a este material. Al mismo tiempo que se analizará si el reaprovechamiento del plástico bajo este sistema resulta competitivo ambientalmente con otros procesos como incineración o vertido.

El proceso general de extracción de agregados naturales consiste en el destape de la zona de explotación. el retiro de toda la vegetación y material en mal estado por medio de una retroexcavadora que carga el mismo en volquetes para ser trasladados a un lugar específico. Una vez descubierto el yacimiento se realiza la perforación mediante un martillo hidráulico o bien, la voladura mediante el uso de explosivos. El uso de un método u otro depende de las restricciones y normativas propias de cada región. La roca extraída es cargada con una excavadora camiones (con capacidades de entre 30 y 40 t) y trasladada a la trituradora de mandíbulas que realizará la primera trituración. La trituradora de mandíbula, que puede encontrarse instalada en la cantera o bien en una planta de producción, presenta generalmente una tolva de descarga que permite lograr una reducción de tamaño inferior a 6 pulgadas.

Luego el material debe pasar por nuevas etapas de trituración. A través de bandas transportadoras la roca triturada es llevada hacia una criba primaria por el que se separa de la línea a todas las partículas correspondientes al polvillo. Después, se pasa el material por una trituradora secundaria de conos de eje vertical, compuesta de un cono, un manto fijo y uno móvil, logrando un tamaño de piedra de 80 mm. Finalmente, por medio de un segundo cribado se separan las partículas de acuerdo al tamaño predeterminado. Las partículas que corresponden al tamaño del agregado deseado pasan por un tornillo lavador, las demás vuelven al cono triturador. El material es clasificado y depositado en cúmulos correspondientes a los distintos tamaños quedando disponibles para su despacho [272][273].

En el artículo de Cuenca y col. [274] se compararon los impactos de la producción de áridos naturales y reciclados y se obtuvieron valores de, por ejemplo, potencial de calentamiento global para el árido natural de 1,81kg CO<sub>2</sub> eq. Hossain y col. [275] por su parte obtuvo para la misma categoría un impacto de entre 23 y 33 kg de CO<sub>2</sub> equivalente dependiendo de si los áridos provienen de río o cantera, y Marinkovik [276] por su parte pudo determinar en su caso de estudio unos 300.000 kg de CO<sub>2</sub> eq. mientras tanto, un trabajo en Argentina [277] se obtuvo un valor de impacto de calentamiento global 327 kgCO<sub>2</sub>-e/m<sup>3</sup> para la producción de áridos naturales

### 8.2.3 Procedimiento para la fabricación de APR

El proceso de reciclado de RAEE, comienza con el ingreso del residuo a la planta de clasificación. Para este análisis se trabajó con la empresa de manejo de RAEEs Ecotech, una empresa de la provincia de Santa Fe que se dedica a la gestión de este tipo de residuos. El proceso que desarrolla la empresa y que se analiza en esta tesis constituye la etapa aquí denominada "Producción de Fracción plástica de RAEE triturada

(FPRT)” y consiste en una recolección y transporte del residuo hasta la planta donde luego se clasifica por tipo de aparato, se desensamblan y se separan sus partes. Las partes que aun funcionan del aparato se venden o donan para su re funcionalización y el resto de los materiales sigue cada uno su flujo. Los porcentajes de cada tipo de material varían de acuerdo al lote de RAEE recibido, en relación tanto a su composición y su peso. Se estima que, de la masa total de materiales, el 10% corresponderá a vidrio, el 25% a metales, el 60% a plásticos y el 5% a otros como circuitos impresos o cables [20]. Como ya dijimos los materiales no plásticos se comercializan tanto en el mercado interno como el externo mientras que el plástico, en este caso se tritura pasando por dos trituradoras diferentes, la primera una desgarradora de gran porte que convierte las carcasas plásticas en trozos de entre 10 a 20 cm y la segunda, un molino triturador que convierte estos trozos en partículas de 3 y 8 cm. Una vez triturado el plástico, el mismo debe ser trasladado a la planta de encapsado en donde se desarrollará la etapa 2 o bien, como la denominaremos de aquí en más; “producción de APR”. En este análisis se contempla el transporte en camión de los plásticos triturados desde la planta de manejo a la planta de producción de APR con una distancia entre ellas de 400 km.

En la planta de producción de APR se recubre la partícula de plástico (core) con 3 capas de cemento de albañilería, aditivos y agua, lo que constituye el material de encapsado (shell). Para obtener 1 t de APR se necesitan 0,411 t de FPR; 0,42 t de cemento de albañilería; 0,03 t de carbón activado y 0,174 t de agua. Estos materiales se dividen en tres partes iguales y se van aplicando a las partículas de FPR en tres etapas diferentes con una separación de 24 horas entre ellas.

Se realiza el primer encapsado, donde se introduce el plástico en una máquina mezcladora de hormigón adaptada que, para este estudio se seleccionó una mezcladora industrial con una capacidad productiva de 2 t/h acorde a la producción en masa de un arido. Una vez introducido el plástico y la máquina puesta a funcionar, se agrega material del shell (cemento de albañilería + carbón activado) y luego se agrega el agua.

Luego se esparce la mezcla sobre una base y se deja secar. En esta etapa no se generan consumos energéticos ni trabajos de maquinarias.

El encapsado se repite dos veces más, con un intervalo de 24 horas entre cada uno para que el fraguado pueda completarse y se realiza también luego del encapsado, un tamizado del material con una malla de 4,8 mm (malla #4). Finalmente, se realiza el proceso de secado, las partículas se dejan secar 7 días a temperatura ambiente. En la Figura 8. 7 se presentan los diagramas de flujo con entradas de materia y energía para cada una de las etapas del proceso.

#### 8.2.4 Definición de objetivos y alcance

El objetivo de este ACV sobre agregados para morteros a base de plásticos reciclados es el de determinar el impacto ambiental asociado a la producción de 1 t de agregado.

Al tratarse de un encapsulado que, entre sus materiales incorpora cemento, resulta apropiado determinar si el uso de este material constituye un factor determinante y porcentualmente significativo a la hora de contabilizar las emisiones del proceso. Es sabido que la producción del cemento constituye una industria energéticamente muy intensiva y que, por lo tanto, contribuye en gran medida al efecto invernadero. Este impacto entonces, se “incorpora en los productos que lo utilizan. En el trabajo de Análisis de ciclo de vida desarrollado por Arena y col., 2002 [260], se establece que, producir una tonelada de cemento emite más de 900 kg de CO<sub>2</sub> eq. con una mayor incidencia durante el proceso de cocción del Clinker.

El estudio se realiza entre las ciudades argentinas de Santa Fe y Córdoba. En donde se encuentran instaladas la planta de manejo de RAEEs y la planta productora de APR respectivamente.

La producción de APR (Figura 8.6) incluye la producción de FPRT (Figura 8.5). La FPRT entra en el sistema como materia prima y su procesamiento se desarrolla en la planta de reciclaje de RAEE. Se incluyen el transporte desde la planta de manejo de RAEEs a la planta productora de APR. Se incluyen también los transportes de las materias primas cemento de albañilería y carbón activado. Se contabiliza también la producción de cemento, carbón activado, energía eléctrica, maquinarias y procesamiento de agua. La construcción de las plantas fue excluida del sistema por falta de datos precisos para el caso de la FPRT y para el caso del APR; la planta piloto propuesta en el capítulo 7, incluye en la misma las etapas de trituración por un lado y distribuciones corresponden a una maquina mezcladora convencional de pequeño porte. Lo que no coincide con lo aquí analizado. De todas formas, en general las infraestructuras no impactan significativamente en los procesos productivos [278]. Los pasos de fraguado y tamizado se realizan de manera manual, a temperatura ambiente por lo que no incluyen entradas de materia ni energía.

Se incluyeron impactos evitados como; la generación de 1 tonelada de RAEEs durante la etapa de producción de FPRT, que, de no ser incorporados en este sistema de reciclaje, irían a vertederos o incineración y las 0,41 t de FPR durante la etapa de producción de APR que terminarían también vertidos o incinerados de no ser reutilizados.

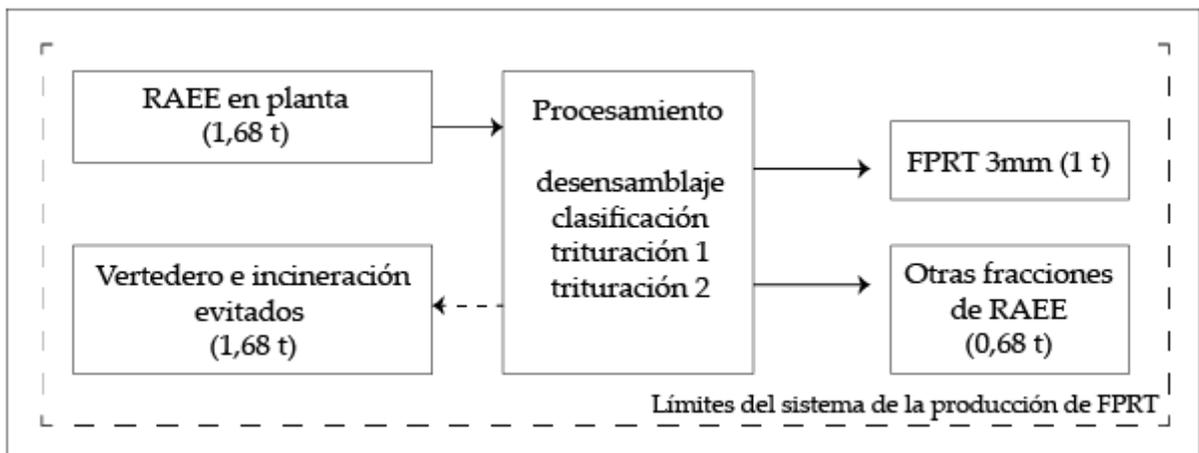


Figura 8. 5. Límites del sistema para la producción de FPRT

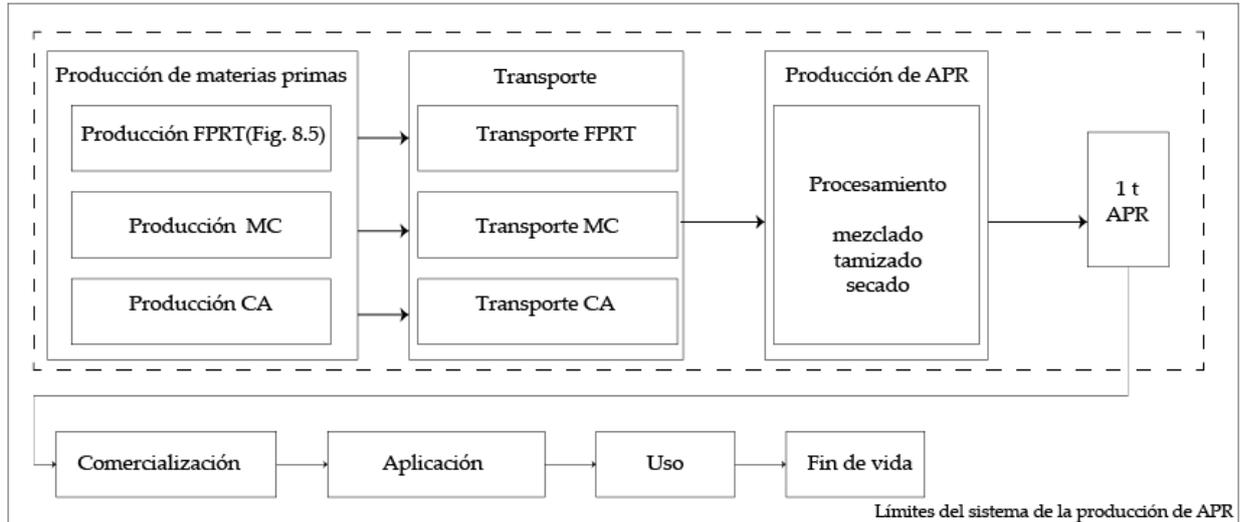


Figura 8. 6: Límites del sistema de la producción de APR.

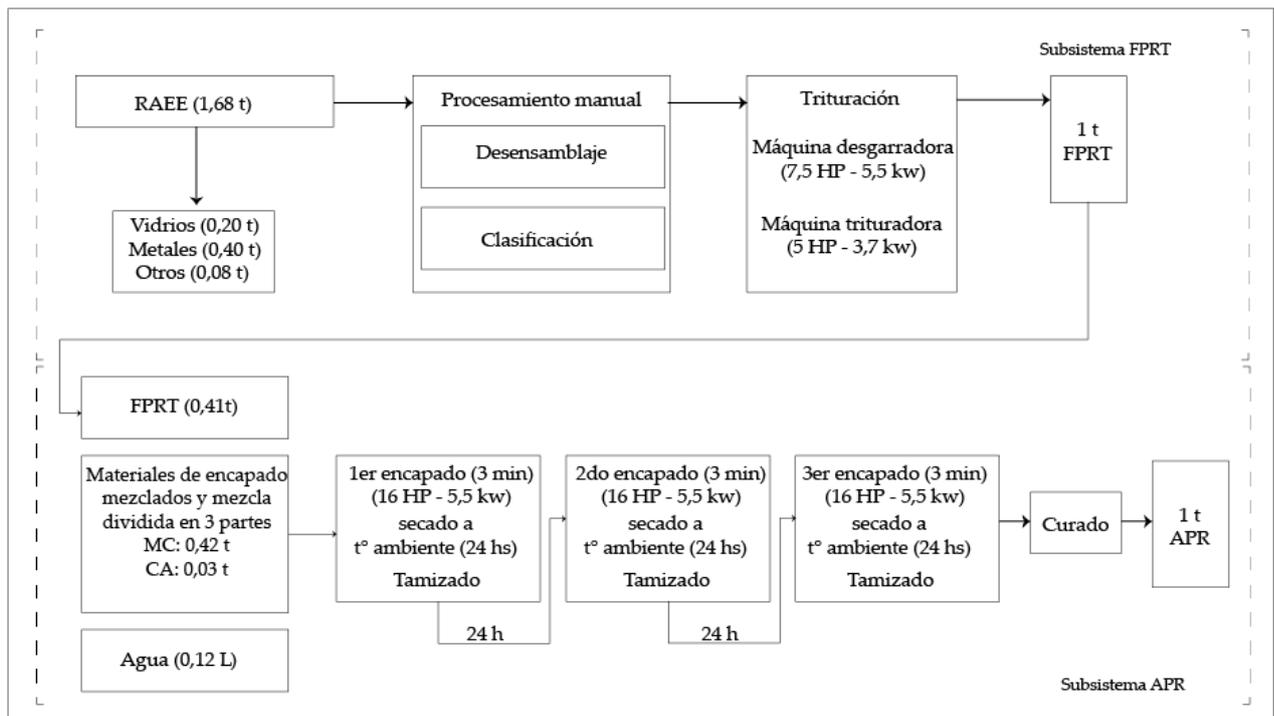


Figura 8. 7: diagramas de flujo de los procesos y límites del sistema para las etapas "Producción de FPRT" y "Producción de APR"

El proceso de fabricación del APR incluye etapas donde el uso de energía eléctrica, transporte, provisión de materias primas y de insumos son imprescindibles para su concreción, comenzado con la obtención de materias primas mediante el reciclado.

### 8.2.5 Materiales y métodos

El agregado elegido para el desarrollo de este análisis corresponde al APR que fue cumpliendo, a medida que iba siendo caracterizado con los criterios establecidos en el capítulo 2. El FPR#3@MC:CA/1, y su dosificación, propiedades físicas y mecánicas se describen en el Capítulo 6.

El estudio se desarrolló en base a los pasos que determina las normas ISO 14040 [258] e ISO 14044 [128]. Se empleó el software *SimaPro* [279] y los datos primarios fueron obtenidos, para la etapa de “producción de FPRT” de entrevistas con trabajadores de la planta y para la etapa de “producción del APR” del proceso propio desarrollado en esta tesis y propuesta de planta piloto desarrollada en el capítulo 7. Sin embargo, ciertos elementos de la planta piloto propuesta fueron modificadas para la realización de este ACV como por ejemplo la elección de la maquina mezcladora que fue reemplazada por una del tipo industrial con el objetivo de que se adapta a los requerimientos de una producción en masa. Los datos secundarios fueron obtenidos desde la base de datos Ecoinvent [280].

Las categorías de impacto seleccionadas para la etapa de evaluación son las recomendadas en la norma UNE-EN 15804 [281] la cual se relaciona con la sostenibilidad en construcciones y determina las categorías de análisis prioritarias para evaluar componentes constructivos o servicios. Estas categorías son entonces (en español con sus siglas en inglés): agotamiento abiótico de elementos (ADe), agotamiento abiótico de combustibles fósiles (Adf), calentamiento global (GW), agotamiento de la capa de ozono (ODP), oxidación fotoquímica (POF), acidificación de suelo y agua (A) y eutrofización las cuales corresponden al método de caracterización CML-IA línea base [282]. Además de estas categorías y para dar mayor consistencia y profundidad al análisis, se incorporan categorías de la metodología ReCiPe *Midpoint*, toxicidad humana con riesgo cancerígeno (HT-C), toxicidad humana sin riesgo cancerígeno (HT-NC), material particulado (PM), eco toxicidad (ET), uso de suelo (LU), consumo de agua (WC) y, como la FPR se encuentra generalmente contaminada con metales pesados y compuestos orgánicos; se incorporan también la toxicidad marina (METP) y la toxicidad en agua dulce (FETP) por haber sido aplicadas en trabajos de ACV que analizan en reciclado específico de FPR debido a los componentes tóxicos que presenta el material. La unidad funcional analizada fue 1 tonelada de APR y el alcance fue definido “de la cuna a la puerta” es decir que abarca todas las etapas producción de materia prima, generación de energía, transporte y producción del APR en sí mismo hasta que se encuentra listo para su comercialización. Los resultados obtenidos entonces se relacionan con las categorías de impacto seleccionadas.

### 8.2.6 Inventario de Ciclo de Vida

En la tabla 8.2 se muestra la lista cuantificada de flujos físicos elementales para la producción de APR conformada por entradas y salidas y la correspondiente base de datos seleccionada para ingresar al software.

Tabla 8. 2: Inventario de entradas y salidas para la producción de APR

Entradas	Valor	Unidad	Base de datos
<b>Producción de FPRT</b>			
RAEE	1,68	t	<i>waste plastic, consumer electronics (RoW) market for/ cut off, units</i>
Electricidad trituración 1	0,072368421	kw/h	

*Fabricación de componentes constructivos con la fracción plástica de los residuos provenientes del reciclado de RAEE*

Electricidad trituración 2	0,0925	kw/h	<i>electricity, medium voltaje (AR) market for /cut off/units</i>
Máquina trituradora 1	1	p	<i>building machine (GLO) market for/ cut off, units</i>
Máquina trituradora 2	1	p	
Productos evitados: RAEE	1	t	<i>Waste electric and electronic equipment (GLO) market for/cut off-units</i>
<b>Producción de APR</b>			
FPRT	0,41	t	
Transporte FPRT	423	km	
Transporte cemento de albañilería	12,7	km	<i>transport, freight lorry 3.5-7.5 metric ton. Euro3 (Row) market for/cut off/ units</i>
Transporte carbón activado	700	km	
Cemento de albañilería	0,42	t	<i>cement, alternative constituents 45% (RoW) market for/ cut off, units.</i>
Carbón activado	0,03	t	<i>activated carbon granular (GLO) market for/ cut off, units.</i>
Agua	0,14	t	<i>tap water</i>
Electricidad encapado 1	1,65	kw/h	<i>electricity, medium voltaje (AR) market for /cut off/units</i>
Electricidad encapado 2	1,65	kw/h	
Electricidad encapado 3	1,65	kw/h	
Maquina mezcladora	1	p/3	<i>building machine (GLO) market for/ cut off, units</i>
<b>Salidas</b>			
<b>Producción de APR</b>			
APR	1	t	
Coproducos	0,68	t	
<b>Emisiones</b>			
Dioxido de carbono, fosil	475,10		
Dioxido de carbono, transformación del suelo	1,08	kg CO <sub>2</sub> eq.	
Monoxido de dinitrógeno	1,67		
Metano, fosil	19,45		

Para obtener 1 tonelada de APR es necesario desarrollar un balance de masas correcto acorde al principio de conservación de masas [283]. Por lo tanto, al sistema deben ingresar 1,68 toneladas de RAEE para obtener así 1 tonelada de FPR, las 0,68 toneladas restantes constituyen subproductos que siguen su flujo propio de comercialización. A la FPR se le aplica un proceso de trituración en dos etapas a las que se les asignó a cada uno su respectivo consumo energético relacionado con el consumo propio de cada máquina y el tiempo de trituración. Así mismo se incorporaron al sistema, la fabricación de las maquinas trituradoras y se les asignó en cada una de las dos etapas de trituración una carga relacionando la unidad funcional elegida y la productividad de la maquina durante toda su vida útil. La vida útil aplicada para las maquinas trituradoras fue de 25 años, teniendo en cuenta datos del fabricante. Una vez la fracción plástica convertida en FPRT, debe ser trasladada 420 km por carretera hasta la planta de producción del APR. Los datos para esta etapa entonces se relacionan con la cantidad de FPRT necesario para obtener 1 tonelada de APR (0,411 t) y con la distancia que debe recorrer el camión. Lo mismo con el cemento de albañilería y el carbón activado, cada uno con la distancia asignada desde la ubicación del proveedor hasta la planta productora de APR. Las distancias asignadas fueron de 12 y 700 km respectivamente.

Una vez ingresados todos los materiales a la planta, comienza la fabricación del APR. La maquinaria fue asignada relacionando la unidad funcional con la capacidad productiva durante la vida útil de la misma (25 años) y al valor obtenido se lo dividió por tres, apuntando a los 3 encapados en los cuales la totalidad del material de encapado se divide también por tres. El agua se ingresa también al sistema como agua de

grifo convencional, dividiendo su valor también en tres partes. Aquí también se ingresó la energía eléctrica que consume la maquinaria relacionando su consumo y horas de trabajo para la UF determinada. Se ingresó también material de RAEE en vertederos o basurales como producto evitado, para que de esta manera el sistema incorpore el impacto evitado de esta práctica. La misma constituye el fin de vida habitual en países en desarrollo para este material.

### 8.2.7 Caracterización de impactos

Bajo la metodología de caracterización seleccionada, se muestran los resultados de la primera etapa del alcance determinado; la producción de FPRT. En Tabla 8.3 se muestran los valores obtenidos para cada categoría de impacto y en la Figura 8.8 se grafican los resultados en relación a cada una de las etapas del proceso.

Tabla 8. 3: Resultados de la caracterización para 1 t de FPRT.

Categoría de impacto		Total
<b>METP</b>	kg 1,4-DB eq	1,63E+05
<b>HTnc</b>	kg 1,4-DB eq	1,16E+04
<b>HTc</b>	kg 1,4-DB eq	3,87E+03
<b>ADf</b>	MJ	8,40E+02
<b>FETP</b>	kg 1,4-DB eq	1,21E+02
<b>GW</b>	Kg CO <sub>2</sub> eq.	7,47E+01
<b>LU</b>	m <sup>2</sup> a crop eq	1,41E+00
<b>WD</b>	m <sup>3</sup>	6,78E-01
<b>A</b>	kg SO <sub>2</sub> eq	2,54E-01
<b>TE</b>	kg 1,4-DB eq	1,53E-01
<b>PM</b>	kg PM2.5 eq	1,29E-01
<b>E</b>	kg PO <sub>4</sub> --- eq	1,26E-01
<b>POF</b>	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	2,75E-02
<b>ADe</b>	kg Sb eq	4,16E-04
<b>ODP</b>	kg CFC-11 eq	4,17E-06

Los resultados muestran que la producción de FPRT genera valores positivos para todas las categorías, lo que se traduce en impactos negativos para el ambiente, al mismo tiempo el hecho de evitar la generación un residuo dañino para el ambiente, los impactos generados por este, se traducen en impactos evitados con valor negativo (RAEE evitado) lo que se convierte en impactos positivos para el ambiente.

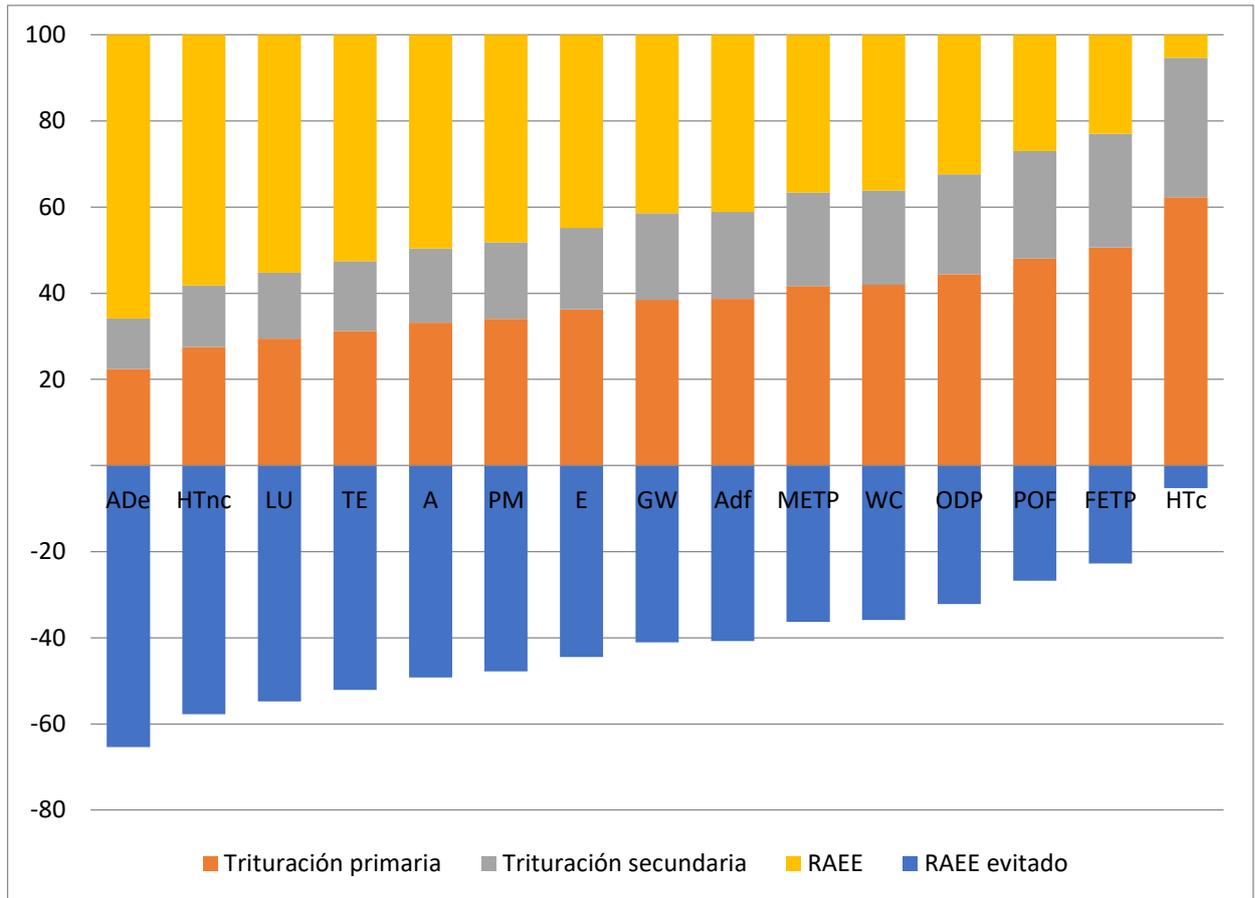


Figura 8. 8: Incidencia de cada categoría de impacto en el proceso de fabricación de FPRT.

Vemos en la Figura 8.6 que, para este proceso que los principales impactos están relacionados a la toxicidad; METP, generado principalmente durante la trituración primaria en un 40%; HTnc causado principalmente por el RAEE, pero compensado con el mismo valor (58%) y HTc, durante la trituración primaria con el 60%. Cuando los impactos están causados por el uso de RAEE como materia prima, en todos los casos se compensa el daño, pero cuando el impacto es causado por otra etapa como las trituraciones, el impacto no se compensa. La trituración primaria constituye la etapa del proceso más problemática debido a las características propias de la máquina que requiere gran cantidad de energía y potencia para transformar carcasas completas en trozos de 10 a 20 cm y por el uso de energía eléctrica para su funcionamiento. Por lo tanto, los altos impactos en GW, Adf se relacionan con la producción y el uso de la maquina cuya energía proviene de recursos fósiles. La producción de FPRT no es otra que el proceso de reciclaje de RAEE, y este proceso como ya dijimos, ha sido analizado por otros autores; Wager y col.[110] en su análisis encontraron también que los principales impactos se relacionan a la toxicidad y la eutrofización, incluso mayores a GW; y las relacionó principalmente a las emisiones de cobre, bromo y antimonio. Emisiones que, durante una incineración, se incrementan 400 veces. Más allá de que los autores encuentran a la producción de plásticos post consumo una alternativa más conveniente que la incineración que genera emisiones directas de materiales tóxicos al ambiente; concluyen que no es posible reciclar RAEEs sin causar impactos ambientales, debido principalmente al uso de maquinarias que requieren de energía eléctrica. Hong y col.[262], encontraron el mayor impacto dentro de la categoría de impacto GW para el reciclaje y posterior vertido e incineración, con 125 kg CO<sub>2</sub> eq. y para el reciclaje sin

tratamiento posterior de, 68 kg CO<sub>2</sub> eq. Valor cercano al arrojado en este análisis de 74 kg CO<sub>2</sub> eq. Alston y col. [111] encontraron los mayores impactos en relación a GW, en la incineración debido a que el proceso es un alto emisor de CO<sub>2</sub>. Encontraron también que la eliminación en vertedero generó un beneficio general al cambio climático, pero este impacto fue aún menor para el reciclaje. Ding y col. [261] por su parte encontraron valores mayores a 400 kg CO<sub>2</sub> eq. para el proceso de reciclaje. Para poder establecer comparaciones cuantitativas es necesario desarrollar un análisis propio en el que se apliquen las mismas metodologías de caracterización de impactos para así poder comparar al proceso de reciclaje que aquí se analiza con otras alternativas de reciclaje como vertedero, pirolisis o incineración. O bien, extraer resultados de trabajos existentes en bibliografía, pero para establecer comparaciones de nivel general ya, en la mayoría de los trabajos publicados no se muestran tablas claras con resultados de caracterización que permitan desarrollar un análisis cuantitativo directo, se combinan diferentes métodos de caracterización en una misma tabla de resultados o bien analizan unidades funcionales diferentes. A los fines de establecer una comparación que sirva para aclarar los resultados aquí obtenidos, se toman los datos propiciados en el libro de Pimentel Real [284] que estableció luego de su propio análisis que para la categoría de calentamiento global; la incineración resulta la de mayor impacto con 2,3 toneladas de CO<sub>2</sub> eq. por tonelada de plásticos. El reciclaje que se desarrolla en países de la Unión Europea alcanza 0,9 toneladas de CO<sub>2</sub> eq. por tonelada de plástico considerando que se evitan las emisiones de producción de plásticos vírgenes y que, el relleno sanitario constituye la alternativa de menor impacto para calentamiento global, con menos de 0,1 toneladas de CO<sub>2</sub> eq. por tonelada de plástico.

Estos valores nos indican que el proceso aquí evaluado de reciclaje de plásticos, genera para calentamiento global, un impacto que corresponde al 3,2% del impacto ocasionado por incineración, al 8,3% del impacto que genera reciclar la misma cantidad de FPR, pero en países desarrollados (esto está relacionado con el menor consumo de energía por no contar con pasos de separación, limpieza y descontaminación del material) y, al 70% del relleno sanitario. Aquí parecería que es “preferible” desarrollar un proceso de reciclaje manual como en el que aquí se analiza. Pero debe tenerse en cuenta que el plástico aquí, no se descontamina y puede terminar almacenado, en basurales, rellenos sanitarios o incinerado.

Ahora, luego de haber determinado los impactos de producir FPRT; la materia prima del APR que, al igual que el resto de las materias primas, deben ser incorporados en el sistema para determinar así el impacto total del proceso. Se determinan los impactos de producir el APR para evaluar su eficiencia ambiental y poder estimar también si el sistema constituye una alternativa a los agregados naturales.

En la Tabla 8. , se muestran los resultados de la caracterización para una tonelada de APR y en la Figura 8. 9 cómo impacta cada etapa del proceso en cada categoría de impacto.

Tabla 8. 4: resultados de la caracterización para 1 t de APR

Categoría de impacto		Total
<b>METP</b>	kg 1,4-DB eq	3,31E+05
<b>HTnc</b>	kg 1,4-DCB	6,65E+04
<b>ADf</b>	MJ	4,49E+03
<b>HTc</b>	kg 1,4-DCB	2,92E+03
<b>GW</b>	kg CO2 eq	4,98E+02
<b>FETP</b>	kg 1,4-DB eq	1,51E+02

<b>LU</b>	m2a crop eq	1,41E+01
<b>A</b>	kg SO2 eq	1,88E+00
<b>WC</b>	m3	1,43E+00
<b>TE</b>	kg 1,4-DB eq	6,77E-01
<b>PM</b>	kg PM2.5 eq	6,33E-01
<b>E</b>	kg PO4--- eq	5,43E-01
<b>POF</b>	kg C2H4 eq	8,13E-02
<b>ADe</b>	kg Sb eq	1,74E-03
<b>ODP</b>	kg CFC-11 eq	3,19E-05

La producción de APR presenta impactos positivos en todas las categorías analizadas, las cuales se traducen daños para el ambiente respectivamente. Como vemos en la Tabla 8. , el mayor impacto se genera para METP, dado principalmente por el carbón activado (AC) con un 34% del impacto, seguido por el uso de cemento de albañilería (MC) con el 26% y FPRT con el 20 (Figura 8.7). Es decir que el mayor impacto en toxicidad marina está dado por las materias primas ingresadas al sistema que, en alguna etapa de su producción producen un impacto que se traslada luego, al APR. La HTnc es la categoría de impacto que le sigue en nivel de daño; siendo sus principales responsables, el MC, el transporte de FPRT, y el AC. Aquí aparte de las sustancias tóxicas que desprenden las producciones tanto MC como de CA, se suma el efecto del transporte que incide debido al peso de la masa trasladada. Por su parte HTc, resulta significativo su impacto con un 54% causado por la FPRT. (Figura 8.7) Los componentes contaminantes del material se neutralizarán luego con los encapados (Shell) de cemento y carbón activado. No es posible percibir bajo las metodologías de análisis elegidas, estos comportamientos químicos de las materias primas, por lo tanto, se observa el elevado impacto. ADf sigue en valores de impacto, con mayores sus valores repartidos entre el MC con el 30%, T-FPRT con el 29% y AC, con el 20%. Aquí las causas son el uso de combustibles fósiles para producir las materias primas y para el combustible del transporte.

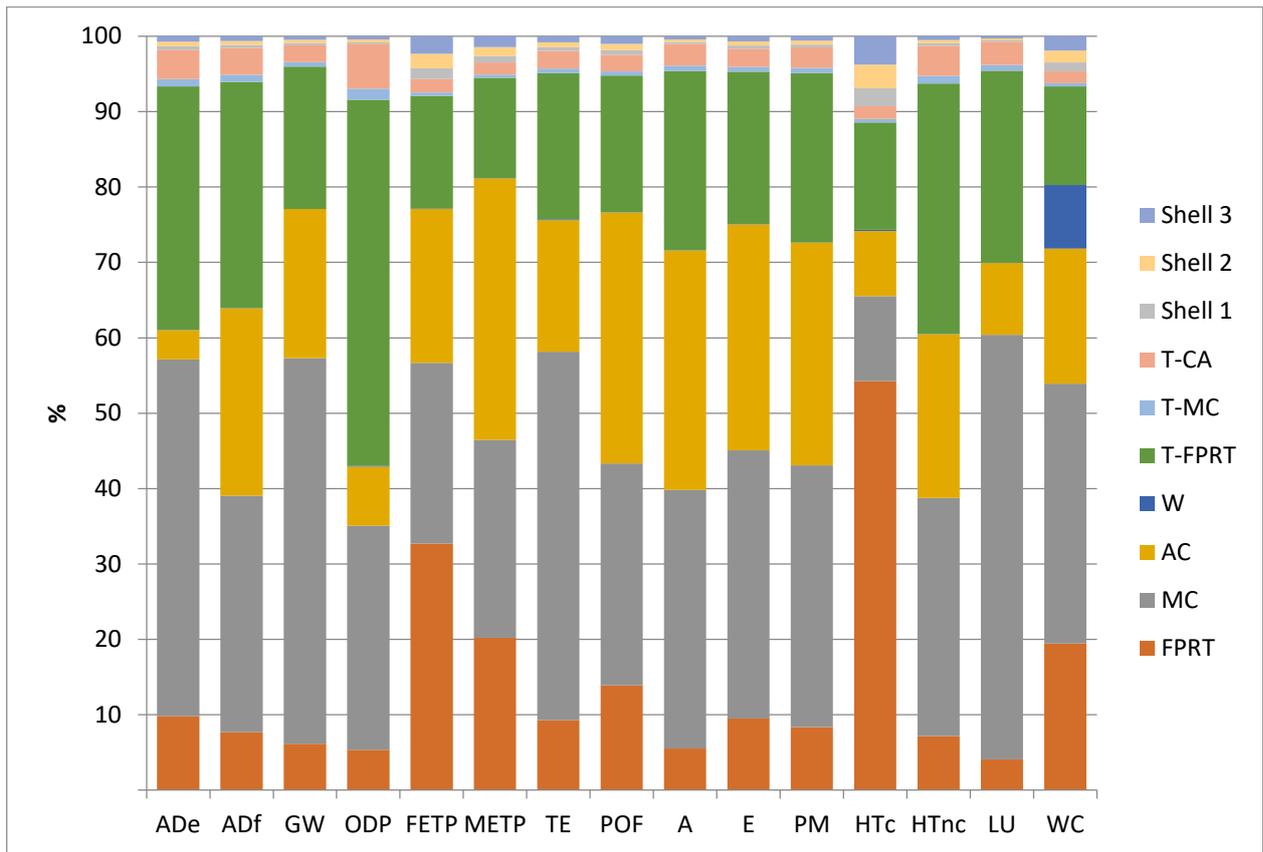


Figura 8. 9: Incidencia de cada categoría de impacto en el proceso de fabricación de APR.

GW, una de las categorías de impacto más estudiadas; presenta un valor intermedio para esta producción de 498 kg de CO<sub>2</sub> eq. dominado principalmente por la producción de MC con el 51%, AC y T-FPRT, impactos lógicos y esperables en todo proceso productivo que requiera el uso de transporte y que principalmente incorpore en uso de cemento. Luego la categoría de impacto FETP, en sexto lugar con un impacto relacionado principalmente a la FPRT y que como dijimos, no puede ser incorporado al sistema el proceso químico de neutralización ni tampoco puede incorporarse un plástico limpio ya que no sería la realidad. Otro impacto significativo, es ODP. No por tener un valor relativamente alto respecto a los demás si no por estar el mismo marcadamente dominado por el T-FPRT y la producción de MC; ambos procesos altamente dañinos para la capa de ozono.

En síntesis, podemos observar en la Figura 8.7 que los mayores impactos están repartidos principalmente entre la producción de FPRT, MC, CA, T-FPRT y que, comparando con la Figura 8.6, los impactos de FPRT relacionados con la toxicidad van dejando espacios a las categorías de ADe, ADf y GW, es decir al impacto de reciclar FPR, se le incorporan los de producir el árido. Las categorías asociadas al uso de combustibles fósiles, emisiones de gases de efecto invernadero y calentamiento global, generalmente están presentes en la mayoría de los procesos productivos, pero en este caso ciertas sustancias a los conocidos contaminantes de la FPRT, generan impactos relacionados a la toxicidad. Se ha comprobado en estudios ACV sobre la producción de carbón activado a partir de madera [285], que la misma genera altos impactos para GW, ADf y ADe en comparación con carbones activados de origen reciclado. La producción de cemento que, aunque en este caso de estudio se trate de un cemento con 45% de reemplazo de Clinker; es responsable de los puntos críticos de sistema No parecen significativos los impactos producidos por maquinaria durante los encapados de partícula (1° Shell, 2° Shell y 3° Shell) debido a que la maquina

elegida para el análisis es la correcta en cuanto a capacidad productiva en relación a la unidad funcional seleccionada.

En relación a los agregados naturales se muestra en la tabla 8.9, una comparación con los impactos obtenidos para agregados naturales por Cuenca y col. [274] con equivalente unidad funcional.

Tabla 8. 4: comparación de impactos de el proceso de producción de APR frente al proceso de producción de agregados naturales desarrollado por Cuenca y col.

Categoría de impacto		APR	AN <sup>1</sup>	(Δ%)
<b>METP</b>	kg 1,4-DB eq	3,31E+05	Nd <sup>2</sup>	-
<b>HTnc</b>	kg 1,4-DCB	6,65E+04	4,29E-07	-100
<b>ADf</b>	MJ	4,49E+03	2,59E+01	-99
<b>HTc</b>	kg 1,4-DCB	2,92E+03	1,66E-07	-100
<b>GW</b>	kg CO2 eq	4,98E+02	1,81E+00	-100
<b>FETP</b>	kg 1,4-DB eq	1,51E+02	Nd	-
<b>LU</b>	m2a crop eq	1,41E+01	4,02E+00	-71
<b>A</b>	kg SO2 eq	1,88E+00	1,59E-02	-99
<b>WC</b>	m3	1,43E+00	1,73E+00	21
<b>TE</b>	kg 1,4-DB eq	6,77E-01	9,77E+00	1343
<b>PM</b>	kg PM2.5 eq	6,33E-01	1,67E-03	-100
<b>E</b>	kg PO4--- eq	5,43E-01	3,35E-03	-99
<b>POF</b>	kg C2H4 eq	8,13E-02	5,77E-04	-99
<b>ADe</b>	kg Sb eq	1,74E-03	2,59E-06	-100
<b>ODP</b>	kg CFC-11 eq	3,19E-05	1,35E-07	-100

<sup>1</sup>ACV de Cuenca y col.  
<sup>2</sup> No determinado

Comparando ambos agregados podemos ver beneficios ambientales de APR frente a AN en las categorías de WC (consumo de agua) y TE (eco toxicidad terrestre). Para las demás categorías de impacto, el AN arrojó un mejor desempeño con menores y mayores variaciones según la categoría. De todas maneras, el impacto en TE para el AN es significativamente alto, los autores lo atribuyen al consumo de combustible de la máquina que extrae las rocas de la cantera. En el caso de APR, los altos impactos en relación a AN puede ser asociados principalmente al uso de cemento y combustibles para el transporte, ya que las sustancias toxicas que determinan daños en FETP, METP y HT son neutralizadas por el sistema core-shell.

### 8.3. Fin de Vida

Los nuevos paradigmas de producción como la economía circular que se posiciona frente a la producción lineal, invitan a diseñar sistemas constructivos en donde se busquen estrategias que apunten a reducir el consumo de materiales naturales, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y promover ambientes saludables y seguros para todas personas que habitan el mundo, entre otros.

En este sentido, se determinó en el Capítulo 2 que en esta tesis intervienen de manera transversal varios de los Objetivos de Desarrollo Sostenible; "Industria, innovación e infraestructura", "producción y consumo responsables", "Acción por el clima", "Vida submarina" y "Vida de ecosistemas terrestres",

“Ciudades y comunidades sostenibles, energía asequible y no contaminante” y “Trabajo decente y crecimiento económico”.

Frente a esto y, como el desarrollo en esta tesis expuesto sigue y seguirá siendo optimizado en el futuro, se propone en este apartado un diseño de fin de vida que, si bien no será desarrollado de manera profunda, propone un enfoque de manera general que responde a los Objetivos de Desarrollo Sostenible y concepto de economía circular, se acopla al ACV desarrollado y aporta un cierre acorde a esta tesis frente a los objetivos mencionados.

Se trata de un diseño de ciclo de vida del APR en donde la trazabilidad, la demolición selectiva y la separación en origen actúan como factores claves e imprescindibles para que el sistema funcione. En la Figura 8.8 se muestra el gráfico correspondiente.

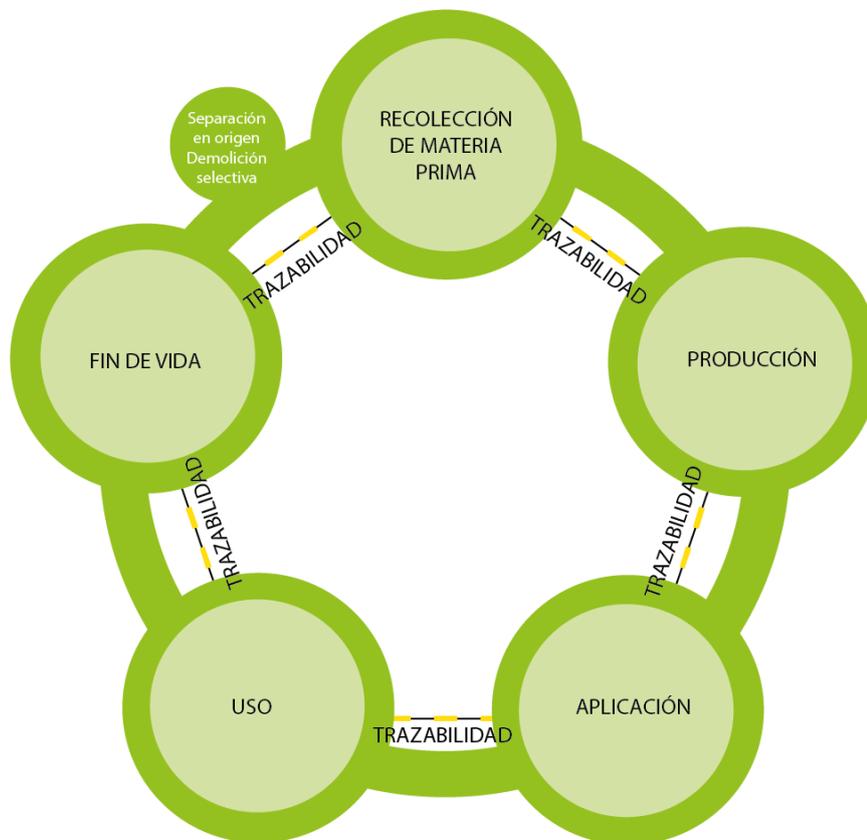


Figura 8. 10: Ciclo de vida del APR.

Etapa de recolección de materia prima: el sistema comienza con el aparato en desuso que es recogido por recolectores formales en la institución o vivienda en donde se produjo el desecho. Aquí ya se podría hablar de un cambio en el paradigma de “extracción” de materia por el concepto “recolección”. En un escenario ideal todas las materias primas podrían ser *recolectadas* en vez de *extraídas*. El recolector lleva el material a la empresa de reciclaje de RAEEs, quien lo recibe y debe realizar una correcta trazabilidad de la cantidad de material recibido y su procedencia. La empresa se ocupará de desarrollar el desmantelamiento manual y dará a cada componente su destino dentro o fuera del mercado interno. La FPR será triturada como se viene haciendo y se volverá a trazar, clasificar y almacenar a la espera de una comercialización.

Etapa de producción: Talleres de producción del APR, que pueden ser, el mismo CEVE, municipios o pequeñas empresas privadas adquieren el material triturado y lo trasladan a su planta. En la planta el material es pesado nuevamente y trazado para luego comenzar con la producción del APR.

Una vez el APR producido es pesado y almacenado para su comercialización. Las empresas constructoras lo pueden adquirirlo para usarlo en morteros o empresas productoras de ladrillos y otros componentes pueden adquirirlo para producir los mismos. En todos los casos, quien los adquiera debe tener pleno conocimiento del material y continuar con su trazabilidad estableciendo la cantidad de APR incorporado en sus productos e identificando estos productos.

Etapa de aplicación: Luego la empresa constructora adquiere los ladrillos (o el árido) y los usará en una edificación teniendo en cuenta siempre las limitaciones mecánicas del material y sus condiciones de seguridad. Aquí también la empresa constructora deberá desarrollar una correcta trazabilidad del material e identificar el lugar en donde se aplicó el material.

Etapa de uso: Debido a sus propiedades mecánicas, y presencia de contaminantes el ladrillo o mortero no podrán ser incorporados como mampuestos de carácter estructural, no podrían ser usados en ambientes a más de 50°C y se sugiere disminuir los daños por canalizado, limitándose a colocación de elementos para fijación (clavos, tacos Fisher, etc.). De todas maneras, se recomienda el uso de mampostería de revoque. Por lo que una correcta trazabilidad se torna excluyente para que el agregado pueda ser incorporado en construcciones y no genere problemas durante la etapa de uso.

Etapa de Fin de vida: Una vez terminada la vida útil de la construcción, la misma debe ser demolida de manera selectiva. Es decir, en el lugar en donde se va a demoler la construcción, la sección que contiene APR debe ser demolida aparte de las demás y su trazabilidad debe ser continuada para así poder reciclar el material y evitar que quede en contacto con el suelo o en un basural.

Luego de una correcta trazabilidad y demolición selectiva en origen, el material es considerado una materia prima y podrá ser trasladado nuevamente a la planta productora de APR en donde se triturará para unificar la granulometría y se realizarán nuevamente las etapas de encapado del material - *core-shell* - para obtener un nuevo APR; cuyas propiedades mecánicas seguramente se verán reducidas y no podrá ser aplicado de la misma manera, pero la neutralización de los contaminantes sí será efectiva.

Pasadas una cierta cantidad de reciclados, ya cuando el material pierda su calidad de manera total; el mismo podría ser reducido a polvo y servir como combustible para otras industrias, como producción de cemento.

#### 8.4. Conclusiones del capítulo

- La producción de APR presenta un impacto alto para “toxicidad marina”. El mismo proviene de la etapa de trituración del plástico.
- Otros impactos relacionados con la toxicidad como “human toxicity-no cancer”, “human toxicity-cancer” y “toxicidad en agua dulce” resultan significativos, también provenientes de la trituración del plástico y podrían estar relacionados con la presencia de contaminantes bromados y compuestos metálicos.
- Categorías relacionadas al consumo de combustibles fósiles, como “agotamiento abiótico de elementos” y “global warming” arrojan impactos altos los cuales se relacionan al uso de cemento y durante las etapas de transporte.

- Respecto a otras formas de gestión del residuo, el reciclaje de FPR constituye la mejor opción frente a la incineración y al relleno sanitario.
- Frente a los agregados naturales, el APR presentó mayores impactos en todas las categorías a excepción de “eco toxicidad terrestre” y “consumo de agua”.

#### 8.5. Futuros análisis

- Frente a la imposibilidad de determinar la disminución en aspectos de “toxicidad” de los APR frente a las FPR con la metodología del Análisis de Ciclo de Vida, resultaría valioso desarrollar un ensayo biológico de eco toxicidad al agregado para comprobar que la neutralización es efectiva en condiciones reales.
- Resultaría de gran importancia evaluar la etapa de uso del mampuesto en su carácter de material aislante térmico y acústico mediante un ACV comparativo del mampuesto frente a otras placas aislantes y frente a otros métodos de refrigeración/calefacción de viviendas.

## CAPITULO 9. CONCLUSIONES GENERALES

En este capítulo se desarrollan las conclusiones generales, las cuales engloban a las conclusiones parciales que se han ido determinando al final de cada capítulo.

## 9.1. Conclusiones

Como ha quedado demostrado, no es posible reciclar plástico de RAEE de manera directa en la industria de la construcción debido a que los contaminantes de naturaleza orgánica presentes en el residuo lixivian en la matriz cementicia. Sin embargo, con el tratamiento desarrollado en esta tesis, tanto los metales como los aditivos presentes en el residuo pudieron ser convenientemente estabilizados mediante el uso de aditivos transformando al desecho en una materia prima apta para la elaboración de componentes constructivos de base cementicia.

Fue factible producir un agregado de plástico reciclado con una innovadora estrategia de *Core-Shell* que cumple con parámetros físicos, químicos y mecánicos que permiten su uso como un reemplazo parcial o total de los agregados naturales. De esta forma, el agregado pudo ser utilizado en la elaboración de componentes constructivos tales como, ladrillos, que fueron caracterizados y alcanzaron valores aptos para mampuestos no portantes y buenas propiedades de aislación térmica.

Mediante el análisis de ciclo de vida, que esta etapa sólo alcanzó al agregado plástico reciclado, se logró determinar que el APR constituye una alternativa viable ambientalmente frente a los agregados naturales, y sobre todo constituye una solución ambiental para la acumulación y vertido de plásticos de RAEEs, que al momento no habían podido ser reincorporados en un ciclo productivo.

Finalmente, de manera general se podría destacar que esta tecnología permite agregar valor a un residuo de las empresas recicladoras de RAEE, aumentando de esta forma la sostenibilidad y mejorando su rentabilidad. Esto permitiría mayor cantidad de empresas del rubro y una mejor tasa de recupero del residuo. A su vez, el proceso productivo del agregado plástico reciclado es sencillo y se requiere bajo costo de inversión en infraestructura y equipamiento por lo que resulta ideal para ser aplicado en países en vías de desarrollo, en donde emprendimientos sociales de mediana escala llevados adelante por cooperativas, ONG y/o pymes, impulsen la economía circular a nivel local.

## 9.2. Proyecciones

Sobre el APR y su aplicación en componentes constructivos:

- Se desarrollará un ensayo de durabilidad por envejecimiento acelerado.
- Se llevarán adelante estudios cuantitativos sobre la liberación de compuesto orgánicos volátiles.
- Los estudios hasta aquí realizados servirán de base para la solicitud del certificado de aptitud técnica del agregado y/o de los componentes constructivos ante la autoridad regulatoria competente.
- Se llevará adelante un estudio de costos de producción.

Sobre la técnica de core shell

En base al éxito obtenido con el reciclado de plásticos usando la estrategia del core Shell se estudiarán otro tipo de plásticos con compuestos químicos de diferente naturaleza.

## Referencias

- [1] É. Hermida, *Polímeros. Colección Materiales y materias primas*, 17. 2011.
- [2] Greenpeace, "El lado toxico de la telefonía movil," 2011.
- [3] E. Dimitrakakis, A. Janz, B. Bilitewski, and E. Gidaracos, "Small WEEE: Determining recyclables and hazardous substances in plastics," *J. Hazard. Mater.*, vol. 161, no. 2–3, pp. 913–919, 2009, doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.04.054.
- [4] S. Reimer, "Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA)," 2005.
- [5] L. S. Chuan Ma, Jie Yu, Ben Wang, Zijian Song, Jun Xiang, Son Hu, Sheng Su, "Chemical Recycling of brominated flame retarded plastics from e-waste for clean fuels production: A review.," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, pp. 433–450, 2016.
- [6] E. Maris, P. Botané, P. Wavrer, and D. Froelich, "Characterizing plastics originating from WEEE: A case study in France," *Miner. Eng.*, vol. 76, pp. 28–37, 2015, doi: 10.1016/j.mineng.2014.12.034.
- [7] W. Schlummer, M., Mäurer, A., Leitner, T., & Spruzina, "Report: Recycling of flame-retarded plastics from waste electric and electronic equipment (WEEE).," *Waste Manag. Res.* 11(4), 287–295., vol. 24(6), pp. 573–583, 2006, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/0734242X06068520>.
- [8] W. Tamaddon, F., & Hogland, "Review of Cadmium in Plastic Waste in Sweden," *Waste Manag. Res.* 11(4), 287–295., 1993, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177%2F0734242X9301100403>.
- [9] E. Dimitrakakis, A. Janz, B. Bilitewski, and E. Gidaracos, "Determination of heavy metals and halogens in plastics from electric and electronic waste," *Waste Manag.*, vol. 29, no. 10, pp. 2700–2706, 2009, doi: 10.1016/j.wasman.2009.05.020.
- [10] E. Stenvall, S. Tostar, A. Boldizar, M. R. S. J. Foreman, and K. Möller, "An analysis of the composition and metal contamination of plastics from waste electrical and electronic equipment (WEEE)," *Waste Manag.*, vol. 33, no. 4, pp. 915–922, 2013, doi: 10.1016/j.wasman.2012.12.022.
- [11] R. van E. Martin Schlummer, Fritz Brandl, Andreas Mäurer, "Analysis of flame retardant additives in polymer fractions of waste of electric and electronic equipment (WEEE) by means of HPLC–UV/MS and GPC–HPLC–UV," *J. Chromatogr. A*, vol. 1064, no. 1, pp. 39–51, 2005.
- [12] Secretariat of the Basel Convention, "Convenio de Basilea: Convenio de Basilea sobre el Control de los Movimientos Transfronterizos de los Desechos Peligrosos y su eliminación," 1998, [Online]. Available: <http://www.basel.int>.
- [13] L. Gu and T. Ozbakkaloglu, "Use of recycled plastics in concrete: A critical review," *Waste Manag.*, vol. 51, pp. 19–42, 2016, doi: 10.1016/j.wasman.2016.03.005.
- [14] C. Sabino, *Método y metodología, el proceso de investigación*. Buenos Aires. Editorial, Lumen–Humanistas., 1996.
- [15] Instituto Argentino de Normalización y Certificación, *IRAM 1622 Cemento Portland. Determinación de resistencias mecánicas*. 2002.
- [16] Comisión Europea, "Directiva 2002/96/CE," *D. Of. la Unión Eur.*, vol. 5, p. L 37/24-39, 2003, [Online]. Available: [http://ofiverde.unizar.es/documents/2002\\_96\\_CE.pdf](http://ofiverde.unizar.es/documents/2002_96_CE.pdf).
- [17] T. S. J. Puckett, *Exportación de daños: la basura de alta tecnología en Asia. The Basel Action Network & Seattle Silicon Valley Toxis Coalition*. Seatle, 2002.

- [18] Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos, *Responsabilidad ampliada del productor: manual de orientación para gobiernos*. 2001.
- [19] G. Forti, Vanessa, Balde, Cornelis P., Kuehr, Ruediger y Bel, *The Global E-Waste Monitor 2020: Cantidades, flujos y potencial de economía circular*. 2020.
- [20] L. M. y A. Burucua, *Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) y empleo en la Argentina*. 2020.
- [21] R. Kuehr *et al.*, *residuos electrónicos 2020*. 2020.
- [22] G. F. Cardamone, F. Ardolino, and U. Arena, "About the environmental sustainability of the European management of WEEE plastics," *Waste Manag.*, vol. 126, pp. 119–132, 2021, doi: 10.1016/j.wasman.2021.02.040.
- [23] R. Taurino, P. Pozzi, and T. Zanasi, "Facile characterization of polymer fractions from waste electrical and electronic equipment (WEEE) for mechanical recycling," *Waste Manag.*, vol. 30, no. 12, pp. 2601–2607, 2010, doi: 10.1016/j.wasman.2010.07.014.
- [24] J.-M. L.-C. Joana Beigbeder, Didier Perrin, Jean-François Mascaro, "Study of the physico-chemical properties of recycled polymers from waste electrical and electronic equipment (WEEE) sorted by high resolution near infrared devices," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 78, pp. 105–114, 2013, [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.07.006.%0A\(https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344913001547\)](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.07.006.%0A(https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344913001547)).
- [25] J. K. S.R. Shamili, C. Natarajan, "An Overview of Electronic Waste as Aggredate in Concrete," *World Acad. Sci. Eng. Technol. - Int. J. Struct. Constr. Eng.*, 2017.
- [26] C. de Viena, *Protocolo de Montreal relativo a las sustancias agotadoras de la capa de ozono*. Canadá, Montreal: Convenio de Viena., 1987.
- [27] C. Ma *et al.*, "Chemical recycling of brominated flame retarded plastics from e-waste for clean fuels production: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 61, pp. 433–450, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.04.020.
- [28] P. A. Wäger, M. Schluep, E. Müller, and R. Gloor, "RoHS regulated Substances in Mixed Plastics from Waste Electrical and Electronic Equipment," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 46, no. 2, pp. 628–635, Jan. 2012, doi: 10.1021/es202518n.
- [29] J. R. D. J. R. Peeters, P. Vanegas, L. Tange, J. Van Houwelingen, "Closed loop recycling of plastics containing Flame Retardants," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 84, pp. 35–43, 2014.
- [30] R. van E. M. Schlummer, L. Gruber, A. Maurer, G. Wolz, "Characterisation of polymer fraction of waste electric and electronical equipment (WEEE) and implications of waste management," *Chemosphere*, vol. 67, no. 9, pp. 1866–1876, 2007.
- [31] M. de los Á. Socas González, "Contaminación por residuos: Islas de plástico," *Univ. La Laguna*, p. 65, 2018, [Online]. Available: [https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/13438/CONTAMINACION\\_POR\\_RESIDUOSISLAS\\_DE\\_PLASTICO.pdf?sequence=1](https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/13438/CONTAMINACION_POR_RESIDUOSISLAS_DE_PLASTICO.pdf?sequence=1).
- [32] S. A. Unnisa and M. Hassanpour, "Development circumstances of four recycling industries (used motor oil, acidic sludge, plastic wastes and blown bitumen) in the world," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 72, no. January, pp. 605–624, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.01.109.
- [33] T. J. C. Ongondo, F. O., I. D. Williams, "'How Are WEEE Doing? A Global Review of the Management of Electrical and Electronic Wastes,'" *Waste Manag.*, vol. 31, no. 4, pp. 714–30, 2011.

- [34] Y. Vazquez, S. Barbosa, B. Aires, and B. Aires, "Valorización sostenible de plásticos provenientes de chatarra electrónica," 2018, no. 1, pp. 1–2.
- [35] & F. C. de la P. RECYCLA Chile S.A, "Residuos Electrónicos La Nueva Basura del Siglo XXI. [http://www.maydaynetwork.cl/wp-content/uploads/2010/05/Residuos\\_electronicos-la-nueva-basura-del-siglo-XXI.pdf](http://www.maydaynetwork.cl/wp-content/uploads/2010/05/Residuos_electronicos-la-nueva-basura-del-siglo-XXI.pdf)," 2007. .
- [36] C. Makri, J. N. Hahladakis, and E. Gidarakos, "Use and assessment of 'e-plastics' as recycled aggregates in cement mortar," *J. Hazard. Mater.*, vol. 379, no. February, p. 120776, 2019, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.120776.
- [37] M. K. and B. C. W. Shotyk, "Contamination of Canadian and European bottled waters with antimony from PET containers," *J. Environ. Monit.*, vol. 8, pp. 282–292, 2006.
- [38] B. T. R. Poon, I. Chu, P. Lecavalier, V.E. Valli, W. Foster, S. Gupta, "Effects of antimony on rats following 90-day exposure via drinking water," *Food Chem. Toxicol.*, vol. 36, no. 1, 1998.
- [39] A. A. and G. B. Gomez-Caminero, A, P Howe, M Hughes, E Kenyon, DR Lewis, m Moore, J Ng, "Environmental Health Criteria 224 ARSENIC AND ARSENIC COMPUNDS (Second Edition)," pp. 1–66, 2001.
- [40] M. K. and B. C. William Shotyk \*, "Contamination of Canadian and European bottled waters with antimony from PET containers," *J. Environ. Monit.*, vol. 8, pp. 282–292, 2006.
- [41] F. Wang, J. Huisman, A. Stevels, and C. P. Baldé, "Enhancing e-waste estimates: Improving data quality by multivariate Input-Output Analysis," *Waste Manag.*, vol. 33, no. 11, pp. 2397–2407, 2013, doi: 10.1016/j.wasman.2013.07.005.
- [42] L. Devia, "Basura electrónica: los riesgos de consumir y descartar," *Saber Cómo*, vol. no. 108, p. 2, 2012.
- [43] CARPL, "Estudio sobre los retardantes de llama bromados en los países del Mediterráneo," *Cent. Act. Reg. para la Prod. Limpia*, 2010.
- [44] J. N. L. Frank Rahman, Katherine H Langford, Mark D Scrimshaw, "Polybrominated diphenyl ether (PBDE) flame retardants," *Sci. Total Environ.*, pp. 1–17, 2001.
- [45] G. T. & R. M. Keith Freegard, *Develop a process to separate brominated flame retardants from WEEE polymers*, no. January. 2006.
- [46] R. G. P. A. Wager, M. Schlupe, E. Muller, "RoHS regulated Substances in Mixed Plastics from Waste Electrical and Electronic Equipment," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 46, no. 2, pp. 628–635, 2012.
- [47] A. Haarman and M. Gasser, *Managing hazardous additives in WEEE plastic from the Indian informal sector*, no. June. 2016.
- [48] A. Aldrian, A. Ledersteger, and R. Pomberger, "Monitoring of WEEE plastics in regards to brominated flame retardants using handheld XRF," *Waste Manag.*, vol. 36, pp. 297–304, 2015, doi: 10.1016/j.wasman.2014.10.025.
- [49] S. Informe, A. y Ta-, "Informe final de la Fase I del Proyecto ACAP sobre retardantes de llama bromados (BFR).," 2008.
- [50] S. Tostar, E. Stenvall, A. Boldizar, and M. R. S. J. Foreman, "Antimony leaching in plastics from waste electrical and electronic equipment (WEEE) with various acids and gamma irradiation," *Waste Manag.*, vol. 33, no. 6, pp. 1478–1482, 2013, doi: 10.1016/j.wasman.2013.03.002.
- [51] P. Eriksson, E. Jakobsson, and A. Fredriksson, "Brominated flame retardants: A novel class of

- developmental neurotoxicants in our environment?," *Environ. Health Perspect.*, vol. 109, no. 9, pp. 903–908, 2001, doi: 10.1289/ehp.01109903.
- [52] J. de B. Adrian Covaci, Andreas C. Gerecke, Robin J. Law, Stefan Voorspoels, Martin Kohler, Norbert V. Heeb, Heather Leslie, Collin R. Allchin, "Hexabromocyclododecanes (HBCDs) in the Environment and Humans: A Review," *Cienc. y Technol. Ambient.*, vol. 40, pp. 3679–3688, 2006, doi: 10.1021 / es0602492.
- [53] S. A. y Ta, "Informe final de la Fase I del Proyecto ACAP sobre retardantes de llama bromados (BFR)." 2008.
- [54] C. A. de W. Adrian Covaci, Stuart Harrad, Mohamed A.-E. Abdallah, Nadeem Ali, Robin J. Law, Dorte Herzke, "Novel brominated flame retardants: A review of their analysis, environmental fate and behaviour," *Environ. Int.*, vol. 37, no. 2, 2011.
- [55] R. J. L. Sabine Kemmlein, Dorte Herzke, "Brominated flame retardants in the European chemicals policy of REACH—Regulation and determination in materials," *J. Chromatogr. A*, vol. 1216, no. 3, 2009.
- [56] C. A. de W. Robin J. Law, Colin R. Allchin, Jacob de Boer, Adrian Covaci, Dorte Herzke, Peter Lepom, Steven Morris, Jacek Tronczynski, "Levels and trends of brominated flame retardants in the European environment," *Chemosphere*, vol. 64, no. 2, 2006.
- [57] A. Covaci, S. Voorspoels, M. A. E. Abdallah, T. Geens, S. Harrad, and R. J. Law, "Analytical and environmental aspects of the flame retardant tetrabromobisphenol-A and its derivatives," *J. Chromatogr. A*, vol. 1216, no. 3, pp. 346–363, 2009, doi: 10.1016/j.chroma.2008.08.035.
- [58] M. S. E. Makinen *et al.*, "Respiratory and dermal exposure to organophosphorus flame retardants and tetrabromobisphenol A at five work environments," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 43, no. 3, pp. 941–947, 2009, doi: 10.1021/es802593t.
- [59] I. Watanabe and S. I. Sakai, "Environmental release and behavior of brominated flame retardants," *Environ. Int.*, vol. 29, no. 6, pp. 665–682, 2003, doi: 10.1016/S0160-4120(03)00123-5.
- [60] H. C. and G. J. Yong Tian, Ai-feng Liu, Guang-bo Qu, Chun-xiao Liu, Jian Chen, Eric Handberg, Jian-bo Shi, "Silver ion post-column derivatization electrospray ionization mass spectrometry for determination of tetrabromobisphenol A derivatives in water samples," *RSC Adv.*, vol. 5, pp. 17474–17481, 2015.
- [61] K. Yamauchi, "Tetrabromobisphenol A," in *Manual de hormonas*, 2016, pp. 593–595.
- [62] R. J. Letcher and S. Chu, "High-sensitivity method for determination of tetrabromobisphenol-S and tetrabromobisphenol-A derivative flame retardants in great lakes herring gull eggs by liquid chromatography-atmospheric pressure photoionization-tandem mass spectrometry," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 44, no. 22, pp. 8615–8621, 2010, doi: 10.1021/es102135n.
- [63] P. H. Howard and D. C. G. Muir, "Identifying new persistent and bioaccumulative organics among chemicals in commerce. III: Byproducts, impurities, and transformation products," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 47, no. 10, pp. 5259–5266, 2013, doi: 10.1021/es4004075.
- [64] A. F. Liu, G. B. Qu, M. Yu, Y. W. Liu, J. B. Shi, and G. Bin Jiang, "Tetrabromobisphenol-A/S and Nine Novel Analogs in Biological Samples from the Chinese Bohai Sea: Implications for Trophic Transfer," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 50, no. 8, pp. 4203–4211, 2016, doi: 10.1021/acs.est.5b06378.
- [65] G. Qu *et al.*, "Identification of tetrabromobisphenol A allyl ether and tetrabromobisphenol A 2,3-dibromopropyl ether in the ambient environment near a manufacturing site and in mollusks at a coastal region," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 47, no. 9, pp. 4760–4767, 2013, doi: 10.1021/es3049916.
- [66] P. L. A. Jenny Rattfelt Nyholm, Roman Grabic, Hans Peter H. Arp, Thomas Moskeland, "Environmental occurrence of emerging and legacy brominated flame retardants near suspected sources in Norway,"

*Sci. Total Environ.*, vol. 443, pp. 307–314, 2013.

- [67] Å. B. J. Alexander, D. Benford, A. Boobis, "Dictamen Científico sobre el Tetrabromobisfenol A (TBBPA) y sus derivados en los alimentos," in *Panel de la EFSA sobre contaminantes de la cadena alimentaria (CONTAM)*.
- [68] W. P. Z. Xie, R. Ebinghaus, R. Lohmann, O. Heemken, A. Caba, "Determinación de trazas del tetrabromobisfenol A retardante de llama en la atmósfera mediante cromatografía de gases y espectrometría de masas," *Anal. Chim. Acta*, pp. 333–342, 2007.
- [69] Z. H. HG Ni, "HBCD y TBBPA en la fase de partículas del aire interior en Shenzhen, China," *Sci. Total Environ.*, vol. 458, pp. 13–19, 2013.
- [70] P. E. H. Viberg, "Diferencias en la neurotoxicidad neonatal de los retardantes de llama bromados, PBDE 99 y TBBPA en ratones," *Toxicología*, vol. 289, pp. 59–65, 2011.
- [71] et al. LT Van der Ven, T. Van de Kuil, A. Verhoef, CM Verwer, H. Lilienthal, PE Leonards, "Efectos endocrinos del tetrabromobisfenol A (TBBPA) en ratas Wistar según lo probado en un estudio de reproducción de una generación y un estudio de toxicidad subaguda," *Toxicología*, vol. 245, pp. 76–89, 2008.
- [72] G. J. Lihong Liu, Aifeng Liu, Qinghua Zhang, Jianbo Shi, Bin He, Zhaojun Yun, "Determination of tetrabromobisphenol-A/S and their main derivatives in water samples by high performance liquid chromatography coupled with inductively coupled plasma tandem mass spectrometry," *J. Chromatogr. A*, pp. 81–86, 2017.
- [73] A. B. Ilonka ATM Meerts, Jelmer J. van Zanden, Edwin AC Luijks, Ingeborg van Leeuwen-Bol, Göran Marsh, Eva Jakobsson, Åke Bergman, Abraham BrouwerIlonka ATM Meerts, Jelmer J. van Zanden, Edwin AC Luijks, Ingeborg van Leeuwen-Bol, Göran Marsh, Eva Jakobsson, Åke, "Interacciones competitivas potentes de algunos retardantes de llama bromados y compuestos relacionados con transtiretina humana in vitro," *Toxicol. Sci.*, pp. 95–104, 2000.
- [74] B. B. KK. Keferi, JO. Okonkwo, OI Oluknle, "Retardantes de llama bromados: fuentes, distribución, vías de exposición y toxicidad," *Environ. Rev.*, vol. 19, pp. 238–253, 2011.
- [75] K. T. CA Wit, JA Björklund, "Éteres de difenilo tri-decabrominados y hexabromociclododecano en el aire interior y el polvo de microambientes de Estocolmo 2: fuentes interiores y exposición humana," *Environ. Int.*, vol. 39, pp. 141–147, 2012.
- [76] et al. NM Tue, S. Takahashi, G. Suzuki, T. Isobe, PH Viet, Y. Kobara, "Contaminación del polvo y el aire en interiores por hifenilos policlorados y retardadores de llama bromados y relevancia de la exposición no dietética en los sitios informales de reciclaje de desechos electrónicos vietnamitas," *Environ. Int.*, vol. 51, pp. 160–167, 2013.
- [77] T. W. DJ Watkins, MD McClean, AJ Fraser, J. Weinberg, HM Stapleton, "Asociaciones entre PBDE en el aire, el polvo y las toallitas superficiales de la oficina," *Environ. Int.*, vol. 59, pp. 124–132, 2013.
- [78] P. S. L. Meijer, J. Weiss, M. Van Velzen, A. Brouwer, Å. Bergman, "Concentraciones séricas de organohalógenos neutrales y fenólicos en mujeres embarazadas y algunos de sus bebés en los Países Bajos," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 42, pp. 4328–4333, 2008.
- [79] A. B. J. Alexander, D. Benford, A. Boobis, "Opinion científica sobre hexabromociclododecanos (HBCDD) en comida," *EFSA J.* 9, p. 2296, 2011.
- [80] N. K. K. Ihhazehiebo, T. Iwasaki, M. Xu, N. Shimokawa, "El factor neurotrófico derivado del cerebro (BDNF) mejora la supresión de la extensión de neuritas de células granulares inducida por hormona tiroidea por hexabromociclododecano (HBCD)," *Neurosci Lett.*, vol. 493, pp. 1–7, 2011.

- [81] A. B. M. Alaei, P. Arias, "Una descripción general de los retardantes de llama bromados utilizados comercialmente, sus aplicaciones, sus patrones de uso en diferentes países/regiones y posibles modos de liberación," *Environ. Int.*, vol. 29, pp. 683–689, 2003.
- [82] et. al. NV. Heeb, WB Scheweizer, P. Mattrel, R. Haag, AC. Gerecke, P. Schmid, "Isomerización regio estereoselectiva de hexabromociclododecanos (HBCD): cinética y mecanismo de isomerización de y a a-HBCD," *Chemosphere*, vol. 73, pp. 1201–1210, 2008.
- [83] S. Z. T. Wu, S. Wang, H. Huang, "Captación, translocación y toxicidad específicas de diastereoisómeros de hexabromo ciclododecano en el maíz," *J. Agr. Food. Chem*, vol. 60, pp. 8528–8534, 2012.
- [84] G. T. V. Palace, B. Park, K. Pleskach, B. Gemmill, "Metabolismo de tiroxina alterado en trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss*) expuesta a hexabromociclododecano (HBCD)," *Chemosphere*, vol. 80, pp. 165–169, 2010.
- [85] A. Kousaiti, V. Savvilitidou, K. Pivnenko, K. Tyrovola, and E. Gidarakos, "Possibilities of Brominated Flame Retardants Extraction From Polymers of E-Waste," no. September, 2018.
- [86] S. K. F. Vilaplana, "Conceptos de calidad para el uso mejorado de materiales poliméricos reciclados: una revisión," *Macromol Mater Eng*, vol. 293, pp. 274–297, 2008.
- [87] P. J. Landrigan and L. R. Goldman, "Children's Vulnerability To Chemicals: A Challenge And Opportunity To ...," *Health Aff.*, vol. 30, no. 5, pp. 842–850, 2011.
- [88] J. Pronczuk de Garbino, "Children's health and the environment.," *A Glob. Perspect. Geneva WHO*, vol. 345, 2004.
- [89] K. Grant *et al.*, "Health consequences of exposure to e-waste: A systematic review," *Lancet Glob. Heal.*, vol. 1, no. 6, pp. e350–e361, 2013, doi: 10.1016/S2214-109X(13)70101-3.
- [90] Parlamento Europeo, "DIRECTIVA 2012/19/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 4 de julio de 2012 sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE)," *D. Of. la Unión Eur.*, pp. 38–71, 2012.
- [91] E. L. P. Europeo, *Directiva 2002/96/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 27 de enero de 2003 sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos*. 2003, p. Diario Oficial de la Unión Europea, 5, 24–39.
- [92] Diario Oficial de la Unión Europea, "Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo," *Parlam. Eur.*, vol. 22, p. 59 pags. (43 artículos), 2008, [Online]. Available: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:312:0003:01:ES:HTML>.
- [93] United Nations Environment Programme., *UNEP Annual Report 2011*. 2011.
- [94] Greenpeace Argentina, "Los residuos electrónicos no son basura," 2023. <https://www.greenpeace.org/argentina/tag/residuoselectronicos/>.
- [95] M. F. Narváez, C. L., Peñaloza, B. V., Solanes, "Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos: ¿Existe un vacío legal? Su problemática en la Argentina," *RD Amb 60*, 2019.
- [96] N. Bengoa, "Se construirán adoquines con plástico reciclado en Chajarí," 2015. <http://www.talcualchajari.com.ar/17158/se-construiran-adoquines-con-plastico-reciclado-en-chajari/>.
- [97] LEGISLATURA DE LA PROVINCIA DE SANTA FE, *LEY N° 13940 GESTIÓN INTEGRAL Y SUSTENTABLE DE RESIDUOS DE APARATOS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS (RAEEs)*. 2020.
- [98] S. S. Xiaoning Yang, Lushi Sun, Jun Xiang, Song Hu, "Pyrolysis and deshalogenation of plastics form

waste electrical and electronic equipment (WEEE): review.," *Waste Manag.*, pp. 462–473, 2013.

- [99] A. K. Panda, R. K. Singh, and D. K. Mishra, "Thermolysis of waste plastics to liquid fuel. A suitable method for plastic waste management and manufacture of value added products-A world prospective," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 1, pp. 233–248, 2010, doi: 10.1016/j.rser.2009.07.005.
- [100] B. H. Robinson, "E-waste: An assessment of global production and environmental impacts," *Sci. Total Environ.*, vol. 408, no. 2, pp. 183–191, 2009, doi: 10.1016/j.scitotenv.2009.09.044.
- [101] A. A. Watson, K. Brigden, M. Shinn, and M. Cobbing, "Toxic Transformers - a review of the hazards of brominated & chlorinated substances in electrical and electronic equipment," *Greenpeace Res. Lab. Tech. Note*, no. January, 2010, [Online]. Available: [http://www.eeb.org/tasks/sites/eeb/assets/file/toxic\\_transformers.pdf](http://www.eeb.org/tasks/sites/eeb/assets/file/toxic_transformers.pdf).
- [102] D. D. Lein Tange, "Waste Electrical and electronic equipment plastics with brominated flame retardants - from legislation to separate treatment - thermal processes.," *Polym. Degrad. Stab.*, pp. 34–40, 2005.
- [103] X. E. Castells, *Reciclaje de residuos industriales: Residuos solidos urbanos y fangos de depuradora*. 2012.
- [104] F. F. Narinder Singh, David Hui, Rupinder Singh, I.P.S. Ahuja, Luciano Feo, "Reciclaje de residuos sólidos plásticos: una revisión del estado del arte y aplicaciones futuras," *Compos. Part B Eng.*, vol. 115, pp. 409–422, 2017.
- [105] B. D. Utracki, L. A., & Favis, "Polymer alloys and blends," in *Handbook of polymer science and technology 4*, 1989, pp. 121-185.
- [106] A. Huisman, J., Botezatu, I., Herreras, L., Liddane, M., Hintsu, J., Luda di Cortemiglia, V., ... & Zan, "Countering WEEE illegal trade (CWIT) summary report, market assessment, legal analysis, crime analysis and recommendations roadmap," Lyon, France, 2015.
- [107] M. Makenji, k., Savage, "Mechanical methods of recycling plastics from WEEE," in *Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Handbook.*, 2012, pp. 212–238.
- [108] I. C. Nnorom and O. Osibanjo, "Sound management of brominated flame retarded (BFR) plastics from electronic wastes: State of the art and options in Nigeria," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 52, no. 12, pp. 1362–1372, 2008, doi: 10.1016/j.resconrec.2008.08.001.
- [109] L. Strobl, T. Diefenhardt, M. Schlummer, T. Leege, and S. Wagner, "Recycling Potential for Non-Valorized Plastic Fractions from Electrical and Electronic Waste," pp. 1–15, 2021.
- [110] P. A. Wäger and R. Hischer, "Life cycle assessment of post-consumer plastics production from waste electrical and electronic equipment (WEEE) treatment residues in a Central European plastics recycling plant," *Sci. Total Environ.*, vol. 529, pp. 158–167, 2015, doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.05.043.
- [111] S. M. Alston and J. C. Arnold, "Environmental impact of pyrolysis of mixed WEEE plastics part 2: Life cycle assessment," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 45, no. 21, pp. 9386–9392, 2011, doi: 10.1021/es2016654.
- [112] E. Hosoda, "International aspects of recycling of electrical and electronic equipment: material circulation in the East Asian region.," *J Mater Cycles Waste Manag*, vol. 9, pp. 140–150, 2007, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10163-007-0179-8>.
- [113] E. F. V. Maritza Delgado, Viviana M. Ambrosi, Néstor E. Castro, Jorge L. Bellavita, "Informe técnico tipos de plásticos presentes en los RAEE." 2017.

- [114] B. K. S. idhya Kunwar, H.N. Cheng, Sriram R Chandrashekar, "Plastics to fuel: a review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, pp. 421–428, 2016.
- [115] H. A. C. Su Shiung Lam, Rock Kee Liew, Ahmad Jusoh, Cheng Tung Chong, Farid Nasir Ani, "Progress in waste oil to sustainable energy, with emphasis on pyrolysis techniques," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, pp. 741–753, 2016.
- [116] H. Y. Jie Yu, Lushi Sun, Chuan Ma, Yu Qiao, "Thermal degradation of PVC: A review," *Waste Manag.*, pp. 300–314, 2016.
- [117] P. C. Idoia Hita, Miriam Arabiourrutia, Martin Olazar, Javier Bilbao, José María Arandes, "Opportunities and barriers for producing high quality fuels from the pyrolysis of scrap tires," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, pp. 745–759, 2016.
- [118] T. Bhaskar, W. J. Hall, N. M. M. Mitan, A. Muto, P. T. Williams, and Y. Sakata, "Controlled pyrolysis of polyethylene/polypropylene/polystyrene mixed plastics with high impact polystyrene containing flame retardant: Effect of decabromo diphenylethane (DDE)," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 92, no. 2, pp. 211–221, 2007, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2006.11.011.
- [119] M. Brebu, T. Bhaskar, K. Murai, A. Muto, Y. Sakata, and M. A. Uddin, "The individual and cumulative effect of brominated flame retardant and polyvinylchloride (PVC) on thermal degradation of acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) copolymer," *Chemosphere*, vol. 56, no. 5, pp. 433–440, 2004, doi: 10.1016/j.chemosphere.2004.04.002.
- [120] J. Ebert and M. Bahadir, "Formation of PBDD/F from flame-retarded plastic materials under thermal stress," *Environ. Int.*, vol. 29, no. 6, pp. 711–716, 2003, doi: 10.1016/S0160-4120(03)00117-X.
- [121] A. Hornung, A. I. Balabanovich, S. Donner, and H. Seifert, "Detoxification of brominated pyrolysis oils," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 70, no. 2, pp. 723–733, 2003, doi: 10.1016/S0165-2370(03)00049-4.
- [122] L. E. Daghe and D. Legione, "PYROLYSIS AND GC/MS-ANALYSIS OF BROMINATED FLAME RETARDANTS IN ON-LINE OPERATION," no. 6, pp. 105–120, 1987.
- [123] R. Weber and B. Kuch, "Relevance of BFRs and thermal conditions on the formation pathways of brominated and brominated-chlorinated dibenzodioxins and dibenzofurans," *Environ. Int.*, vol. 29, no. 6, pp. 699–710, 2003, doi: 10.1016/S0160-4120(03)00118-1.
- [124] X. Yang, L. Sun, J. Xiang, S. Hu, and S. Su, "Pyrolysis and dehalogenation of plastics from waste electrical and electronic equipment (WEEE): A review," *Waste Manag.*, vol. 33, no. 2, pp. 462–473, 2013, doi: 10.1016/j.wasman.2012.07.025.
- [125] J. Mark, F.E., Dresch, H., Bergfeld, B., Dima, B., Grüttner, W., Kleppmann, F., Kramer, K., Lehner, T., Vehlou, "Large scale demonstration of the treatment of electrical and electronic shredder residue," *Plastics Europe*. <[www.plasticseurope.org](http://www.plasticseurope.org)>., 2006. .
- [126] F. R. Arroyo Morocho, "La Economía Circular Como Factor De Desarrollo Sustentable Del Sector Productivo," *INNOVA Res. J.*, vol. 3, no. 12, pp. 78–98, 2018, doi: 10.33890/innova.v3.n12.2018.786.
- [127] "Economía Circular. Definición, Características y Ejemplos." <https://economiecircular.xyz/> (accessed Jul. 28, 2022).
- [128] IRAM-ISO, *IRAM ISO 14044 Gestion Ambiental- Análisis de Ciclo de Vida - Requisitos y Directrices*. 2006.
- [129] R. Geyer, B. Kuczenski, T. Zink, and A. Henderson, "Common Misconceptions about Recycling," *J. Ind. Ecol.*, vol. 20, no. 5, pp. 1010–1017, 2016, doi: 10.1111/jiec.12355.
- [130] M. Hernández Tascón, "La construcción sostenible," vol. 148, pp. 148–162.

- [131] D. R. Askeland, *Ciencia e ingeniería de los materiales*. 2004.
- [132] M. D. M. Cansario Pérez, "Sistema constructivo de paneles aligerados con poliestireno expandido y malla electrosoldada espacial: estudio estructural y optimización.," Universitat Politècnica de Catalunya., 2005.
- [133] Y. V. Vazquez and S. E. Barbosa, "Recycling of mixed plastic waste from electrical and electronic equipment. Added value by compatibilization," *Waste Manag.*, vol. 53, pp. 196–203, 2016, doi: 10.1016/j.wasman.2016.04.022.
- [134] P. F. Sommerhuber, T. Wang, and A. Krause, "Wood-plastic composites as potential applications of recycled plastics of electronic waste and recycled particleboard," *J. Clean. Prod.*, vol. 121, pp. 176–185, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.02.036.
- [135] M. P. ( Adhikary, K. B., Pang, S., & Staiger, "Dimensional stability and mechanical behaviour of wood–plastic composites based on recycled and virgin high-density polyethylene (HDPE)," *Compos. Part B Eng.*, vol. 39, no. 5, pp. 807–815, 2008.
- [136] R. Gaggino *et al.*, "Del Neumático al Techo," *Rev. Obras y Protag.*, vol. 243, no. 3, pp. 19–21, 2016, [Online]. Available: <http://www.oyp.com.ar/nueva/revistas/243/1.php?con=2>.
- [137] L. E. Peisino *et al.*, "Morteros cementicios con residuos de plástico PET y RAEE," *Cienc. y Tecnol. los Mater.*, no. 8, pp. 67–80, 2018.
- [138] R. Gaggino, J. Kreiker, L. E. Peisino, and J. Gonzales Laria, "Una casa construida con ladrillos de PET," *Obras y Protag.*, vol. 253, pp. 31–32, 2017.
- [139] R. Gaggino, "a r t í c u l o s Elementos constructivos con PET re c i c l a d o," vol. 19, pp. 51–64, 2003.
- [140] R. Gaggino, J. Kreiker, L. E. Peisino, M. P. Sánchez Amono, J. Gonzales Laría, and M. Gómez, "Plástico reciclado. Ladrillos. Una alternativa inclusiva y sustentable para municipios y emprendedores," *Vivienda*, vol. 659, pp. 94–99, 2017.
- [141] R. Universidad de Chile. Instituto de la Vivienda, "Ladrillos y placas prefabricadas con plásticos reciclados aptos para la autoconstrucción," *Rev. INVI*, vol. 23, no. 63, pp. 137–163, 2008, [Online]. Available: <http://revistainvi.uchile.cl/index.php/INVI/article/view/446/955>.
- [142] M. S. Parmigiani, *Reglameto Argentino de Estructuras de Mampostería*, Julio 2007. Argentina, 2007.
- [143] Neville, *Properties of concrete*. Pitman Publishing Ltd, 1981.
- [144] D. Z. Ke Ru Wu, An Yan, Wu Yao, "The influence of RPCA on the strength and fracture toughness of HPC," *Cem. Concr. Res.*, vol. 32, no. 2, 2002.
- [145] S. B. Mohammed Seddik Meddah, Salim Zitouni, "Effect of content and particle size distribution of coarse aggregate on the compressive strength of concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 4, 2010.
- [146] N. Saikia and J. De Brito, "Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 34, pp. 385–401, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.066.
- [147] R. Gaggino, "Ladrillos Y Placas Prefabricadas Con Plásticos Reciclados Aptos Para La Autoconstrucción Recycled Plastic Bricks and Panels for Selfconstruction," *Nº*, vol. 63, no. August 2008, pp. 137–163, 2008.
- [148] S. Gallen, "SKAT Swiss Centre for Development Cooperation in Technology and Management," 1993, [Online]. Available: <http://madeingreatlakes.com/wp-content/uploads/2017/07/Appropriate-Building-Materials..pdf>.

- [149] B. T. A. Manjunath, "Partial Replacement of E-plastic Waste as Coarse-Aggregate in Concrete," *Procedia Environ. Sci.*, vol. 35, pp. 731–739, 2016, doi: 10.1016/j.proenv.2016.07.079.
- [150] O. Y. Marzouk, R. M. Dheilily, and M. Queneudec, "Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites," *Waste Manag.*, vol. 27, no. 2, pp. 310–318, 2007, doi: 10.1016/j.wasman.2006.03.012.
- [151] Y. W. Choi, D. J. Moon, Y. J. Kim, and M. Lachemi, "Characteristics of mortar and concrete containing fine aggregate manufactured from recycled waste polyethylene terephthalate bottles," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 8, pp. 2829–2835, 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.02.036.
- [152] S. Akçaözöğlü, C. D. Atiş, and K. Akçaözöğlü, "An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete," *Waste Manag.*, vol. 30, no. 2, pp. 285–290, 2010, doi: 10.1016/j.wasman.2009.09.033.
- [153] S. R. Rodrich Guevara and J. C. Silva Ocas, "Influencia Del Agregado De Concreto Reciclado Sobre Las Propiedades Mecánicas En Un Concreto Convencional," 2018.
- [154] M. A. ; G. G. ; y S. D. Fahad K. Alqahtani ; M. Iqbal Khan, "Novel lightweight concrete containing manufactured plastic aggregate," *Constr. Build. Mater.*, vol. 148, pp. 386–397, 2017.
- [155] J. Torres Agredo, J. Trochez Serna, and R. Mejía de Gutierrez, "Reutilización de un residuo de la industria petroquímica como adición al cemento portland," *Ing. y Cienc.*, vol. 8, no. 15, pp. 141–156, 2012, doi: 10.17230/ingciencia.8.15.7.
- [156] H. A. Arafat, V. M. Hebatpuria, H. S. Rho, N. G. Pinto, P. L. Bishop, and R. C. Buchanan, "Immobilization of phenol in cement-based solidified/stabilized hazardous wastes using regenerated activated carbon: Role of carbon," *J. Hazard. Mater.*, vol. 70, no. 3, pp. 139–156, 1999, doi: 10.1016/S0304-3894(99)00127-2.
- [157] G. Fernández, "Estudio sobre los circuitos formales e informales de gestión de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos en Argentina," pp. 1–87, 2007.
- [158] S. V. J. Crane, Renee E., Cassidy D.P., "Activated Carbon Preconditioning to Reduce Contaminant Leaching in Cement-Based Stabilization of Soils," *J. Environ. Eng.*, vol. 140, no. 10, 2014.
- [159] R. Siddique, J. Khatib, and I. Kaur, "Use of recycled plastic in concrete: A review," *Waste Manag.*, vol. 28, no. 10, pp. 1835–1852, 2008, doi: 10.1016/j.wasman.2007.09.011.
- [160] K. Senthil Kumar and K. Baskar, "Development of Ecofriendly Concrete Incorporating Recycled High-Impact Polystyrene from Hazardous Electronic Waste," *J. Hazardous, Toxic, Radioact. Waste*, vol. 19, no. 3, p. 04014042, Jul. 2015, doi: 10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000265.
- [161] G. Gurnani, N., Sharma, A. & Talukder, "Comparison of the clastogenic effects of antimony trioxide on mice in vivo following acute and chronic exposure," *Biometals*, vol. 5, pp. 47–50, 1992.
- [162] J. A. B.M Elliott, J.M Mackay, P Clay, "An assessment of the genetic toxicology of antimony trioxide," *Mutat. Res. Toxicol. Environ. Mutagen.*, vol. 45, no. 1–2, pp. 109–117, 1998.
- [163] S. H. Koichi Kuroda, Ginji Endo, Akiyoshi Okamoto, Young S. Yoo, "Genotoxicity of beryllium, gallium and antimony in short-term assays," *Mutat. Res. Lett.*, vol. 264, no. 4, pp. 163–170, 1991.
- [164] T. G. Rossman and C. B. Klein, "Genetic Toxicology of Arsenic and Antimony," *Biol. Chem. Arsenic, Antimony Bismuth*, pp. 331–351, 2010, doi: 10.1002/9780470975503.ch14.
- [165] O. Frías, M., Sánchez de Rojas, M. I., & Rodríguez Largo, "Novedades en el reciclado de materiales en el sector de la construcción: adiciones puzolánicas," in *II Jornadas de Investigación en Construcción (Instituto de Ciencias de la Construcción "Eduardo Torroja", Madrid, 22-24 mayo 2008): Actas de las*

Jornadas. H.1. Materiales: Cementos, morteros y hormigones., 2008, pp. 1415–1424.

- [166] M. P, “Recyclability of FR-PC/ABS composites using non-halogen flame retardants,” *Ardsley, NY Supresta U.S. LLC*, 2005.
- [167] L. S. Morf, J. Tremp, R. Gloor, Y. Huber, M. Stengele, and M. Zennegg, “Brominated flame retardants in waste electrical and electronic equipment: Substance flows in a recycling plant,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 39, no. 22, pp. 8691–8699, 2005, doi: 10.1021/es051170k.
- [168] R. M. Hester, R. E., & Harrison, *Electronic waste management*. 2009.
- [169] A. Turner and M. Filella, “Bromine in plastic consumer products – Evidence for the widespread recycling of electronic waste,” *Sci. Total Environ.*, vol. 601–602, pp. 374–379, 2017, doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.05.173.
- [170] T. Solutions, “Consumo global de retardantes de llama 2011,” *Tech. rep.*, 2012.
- [171] A. Heeb, NV, Schweizer, WB, Kohler, M. y Gerecke, “1, 2, 5, 6, 9, 10-hexabromociclododecanos: una clase de compuestos con una estereoquímica compleja,” in *el tercer taller internacional sobre retardantes de llama bromados, Toronto*, 2004, pp. 337–340.
- [172] C. Tange, L., & Slijkhuis, “The classification of WEEE plastic scrap in view of PBB’s & PBDE’s. An overview of WEEE categories within the current recycling practice.,” *Eur. Electron. Recycl. Assoc. Eur. Brominated Flame Retard. Ind. Panel*, 2009.
- [173] P. Hennebert, “WEEE plastic sorting for bromine essential to enforce EU regulation,” *Waste Manag.*, vol. 71, pp. 390–399, 2018, doi: 10.1016/j.wasman.2017.09.031.
- [174] J. F. M. Christie Gallen, Andrew Banks, Sicco Brandsma, Christine Baduel, Phong Thai, Geoff Eaglesham, Amy Heffernan, Pim Leonards, Paul Bainton, “Towards development of a rapid and effective non-destructive testing strategy to identify brominated flame retardants in the plastics of consumer products,” *Sci. Total Environ.*, vol. 491–492, pp. 255–265, 2014.
- [175] K. Law *et al.*, “Bioaccumulation and trophic transfer of some brominated flame retardants in a Lake Winnipeg (Canada) food web,” *Environ. Toxicol. Chem.*, vol. 25, no. 8, pp. 2177–2186, 2006, doi: 10.1897/05-500R.1.
- [176] K. Gustafsson, M. Björk, S. Burreau, and M. Gilek, “Bioaccumulation kinetics of brominated flame retardants (polybrominated diphenyl ethers) in blue mussels (*Mytilus edulis*),” *Environ. Toxicol. Chem.*, vol. 18, no. 6, pp. 1218–1224, 1999, doi: 10.1897/1551-5028(1999)018<1218:BKOBFR>2.3.CO;2.
- [177] D. Meironyte, K. Noren, and A. Bergman, “ANALYSIS OF POLYBROMINATED DIPHENYL ETHERS IN SWEDISH HUMAN MILK. A TIME-RELATED TREND STUDY, 1972-1997,” *J. Toxicol. Environ. Heal. Part A*, vol. 58, no. 6, pp. 329–341, Nov. 1999, doi: 10.1080/009841099157197.
- [178] P. Darnerud, “Toxic effects of brominated flame retardants in man and in wildlife,” *Environ. Int.*, vol. 29, no. 6, pp. 841–853, Sep. 2003, doi: 10.1016/S0160-4120(03)00107-7.
- [179] E. G. Athanasia Kousaiti, John N. Hahladakis, Vasiliki Savvilitidou, Kostyantyn Pivnenko, Konstantina Tyrovolá, Nikolaos Xekoukoulotakis, Thomas F. Astrup, “Assessment of tetrabromobisphenol-A (TBBPA) content in plastic waste recovered from WEEE,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 390, 2020.
- [180] W. D. Yuan Chen, Jinhui Li, Lieqiang Chen, Shusheng Chen, “Brominated Flame Retardants (BFRs) in Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Plastics and Printed Circuit Boards (PCBs),” *Procedia Environ. Sci.*, vol. 16, pp. 552–559, 2012.
- [181] J. L. Ruiz-Herrero *et al.*, “Mechanical and thermal performance of concrete and mortar cellular materials containing plastic waste,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 104, pp. 298–310, 2016, doi:

10.1016/j.conbuildmat.2015.12.005.

- [182] IRAM, *IRAM 1015 Agregados Análisis Granulométrico*. 2005.
- [183] Instituto Argentino de Normalización y Certificación, *IRAM 1505 Análisis Granulométrico*. 2005.
- [184] M. S. Parmigiani, *Reglamento Argentino De Estructuras De Hormigón*, Julio 2005. Argentina: INTI - CIRSOC, 2005, p. 466.
- [185] Instituto Argentino de Normalización y Certificación, "IRAM 1627 - Agregados, granulometría de los agregados," 1997.
- [186] L. A. Boada Noriega, "Análisis de toxicidad de un residuo por medio del método de extracción y lixiviación-Norma SW-846: Método 1310A (EP), Método 1311 (TCLP) Bachelor's thesis, Bogotá-Uniandes," 2004.
- [187] USEPA, "Method 1311: Toxicity Characteristic Leaching Procedure, SW 846 Test Methods for Evaluation of Solid Wastes: Physical/Chemical Methods," no. July 1992, pp. 1–35, 1992.
- [188] J. R. Peeters, P. Vanegas, J. R. Duflou, T. Mizuno, S. Fukushige, and Y. Umeda, "Effects of boundary conditions on the end-of-life treatment of LCD TVs," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 62, no. 1, pp. 35–38, 2013, doi: 10.1016/j.cirp.2013.03.092.
- [189] P. Mehta, K.; Monteiro, "Concreto, estructura, propiedades y materiales," *IMCyC*, p. 38, 1998.
- [190] C. J. Zega, "Propiedades Físico - Mecánicas y Durables de Hormigones Reciclados," p. 190, 2010.
- [191] P. Mehta, P. K., & Monteiro, "Concreto: estructura, propiedades y materiales.," *Inst. Mex. del Cem. y del Concreto.*, 1998.
- [192] L. Scanferla, "Evaluación de los agregados localmente disponibles para ser empleados en hormigones de pavimentos.," Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional La Plata, Argentina., 2010.
- [193] F. M. Casanovas, *Hormigón*. 2005.
- [194] A. Zerga Ardiles, "Influencia de la forma y textura de los agregados finos de las canteras Comasur y Cabeza de Toro en las propiedades físico mecánicas del mortero cementíceo en el distrito Independencia, Provincia de Pisco," 2007.
- [195] N. A., *Tecnología del concreto*. IMCYC México, 1999.
- [196] L. Palbol, "Optimización de los agregados para concreto," *Construcción y Tecnol.*, vol. 9, no. 100, p. 30, 1996.
- [197] S. H. K. W. et al Kosmatka, *Diseño y control de mezclas de Concreto*, vol. Primera Ed. 2004.
- [198] R. Uribe, "El control de calidad en los agregados para concreto 3a parte," *Construcción y Tecnol. México*, vol. 40, no. 34, 1991.
- [199] A. Acosta, J. Cabrera, and A. Medina, "Influencia de la forma y la textura de los agregados gruesos en las propiedades del hormigón," *1er Congr. Nac. Ing. Civ.*, vol. 1, p. 6, 2007.
- [200] H. A. Aranda, J. R., & Silva, "Evaluación del tamaño del agregado grueso para la determinación de la resistencia de la compresión del concreto," Universidad Nacional del Santa. Facultad de Ingeniería, Chimbote, Perú., 2006.
- [201] G. Porrero, J., Ramos, C., Grases, J., & Velazco, *Manual del concreto estructural*. Caracas, Venezuela, 2004.
- [202] E. I. M. José Luis Chan Yam, Rómel Solís Carcaño, "Influencia de los agregados pétreos en las

- características del concreto,” *Ingeniería*, vol. 7, no. 2, pp. 39–46, 2003.
- [203] E. Campos, “Determinación de las propiedades físico mecánicas de los agregados extraídos de las canteras ‘Josecito’ y ‘Manuel Olano’ y su influencia en la calidad de concreto  $f'c= 250 \text{ kg/cm}^2$ , en la ciudad de Jaén,” *Univ. Nac. Cajamarca*, 2017.
- [204] R. Alatorre, J., & Uribe, “Agregados para concreto: cada cual por su nombre,” *Agreg. para concreto cada cual por su Nr.*, vol. 10, no. 121, pp. 13–14, 1998.
- [205] A. Bracamonte Miranda, M. Vertel Morinson, and J. Cepeda, “Caracterización físico-mecánica de agregados pétreos de la formación geológica Tolu Viejo (Sucre) para producción de concreto,” *Sci. Tech.*, vol. 18, no. 2, pp. 429–436, 2013, doi: 10.22517/23447214.8635.
- [206] A. Sepúlveda, “Sustancias Delétereas en el hormigón,” 2014.
- [207] P. Maiza, P., Batic, O. R., Marfil, S. A., Grecco, L., & Giglio, “Evaluación de la reactividad alcalina potencial de los agregados gruesos y finos utilizados en la zona de Viedma (prov. de Río Negro).,” *Web*, 2008.
- [208] S. A. Maiza, P., & Marfil, “Rocas riolíticas en agregados para concreto,” [https://repositoriosdigitales.mincyt.gob.ar/vufind/Record/CICBA\\_cf5d441a1fe30b61b132b9cfa553c190](https://repositoriosdigitales.mincyt.gob.ar/vufind/Record/CICBA_cf5d441a1fe30b61b132b9cfa553c190), 2003. .
- [209] IRAM, “IRAM 1674: Determinación de la reactividad alcalina potencial. Método acelerado de la barra de mortero.,” 1997.
- [210] P. J. . Marfil, S. A, y Maiza, “ANÁLISIS MULTIVARIADO (COMPONENTES PRINCIPALES) APLICADO AL ESTUDIO DE LA COMPOSICION DE AGREGADOS FINOS UTILIZADOS EN LA ZONA DE BAHIA BLANCA.,” in *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952., 1967, pp. 5–24.
- [211] Infobae, “‘Esto se veía venir’: las teorías sobre la causa del derrumbe del edificio residencial en Miami,” <https://www.infobae.com/america/eeuu/2021/06/24/esto-se-veia-venir-las-teorias-sobre-la-causa-del-derrumbe-del-edificio-residencial-en-miami/>, 2021. .
- [212] I. P. y S. S. de O. P. Ministerio de Planificación Federal, *Reglamento CIRSOC 501*. 2007.
- [213] IRAM, “IRAM 1569: Morteros y hormigones, sus componentes (Definiciones),” 1990.
- [214] Instituto Argentino de Normalización y Certificación, *IRAM 1501 Tamices de ensayo. Tela de tejido metálico, chapa metálica perforada y lámina electroformada. Tamaños nominales de abertura*. 1978.
- [215] Instituto Argentino de Normalización y Certificación, *IRAM 1520 Agregados Finos - Densidades*. 2002.
- [216] CIRSOC 101, “Reglamento Argentino de Cargas Permanentes y Sobrecargas Mínimas de Diseño para Edificios y otras Estructuras,” 2005, [Online]. Available: <https://www.inti.gov.ar/cirsoc/pdf/101/reglamento/Reglamento-cirsoc101-completo.pdf>.
- [217] IRAM, *IRAM 12566 Ladrillos cerámicos macizos para la construcción de muros – Requisitos*. .
- [218] Instituto Argentino de Normalización y Certificación, *IRAM 1601 Agua para morteros y hormigones de cemento Portland*. 2012.
- [219] A. A. Ramezani pour, M. Esmaili, S. A. Ghahari, and M. H. Najafi, “Laboratory study on the effect of polypropylene fiber on durability, and physical and mechanical characteristic of concrete for application in sleepers,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 44, pp. 411–418, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.02.076.
- [220] S. P. Yap, U. J. Alengaram, and M. Z. Jumaat, “Enhancement of mechanical properties in polypropylene- and nylon-fibre reinforced oil palm shell concrete,” *Mater. Des.*, vol. 49, pp. 1034–1041, 2013, doi:

10.1016/j.matdes.2013.02.070.

- [221] N. Banthia and R. Gupta, "Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 36, no. 7, pp. 1263–1267, 2006, doi: 10.1016/j.cemconres.2006.01.010.
- [222] A. Luis, N. Rendón, and M. E. Korody, "Polyethylene Teraftalate (PET) - Cement mixture designs," *Rev. la Fac. Ing.*, vol. 23, no. 1, pp. 77–86, 2008.
- [223] V. L. Taus, "Análisis De La Succión Capilar En Hormigones : Influencia De Distintos Parámetros De Ensayo," p. 193, 2010.
- [224] M. S. Gómez, A. M. Carvajal, and V. Santelices, "Influencia del Polietileno de Alta Densidad (PEAD) usado como adición en el mortero de cemento," *Rev. la Constr.*, vol. 10, no. 3, pp. 110–121, 2011, doi: 10.4067/s0718-915x2011000300011.
- [225] K. S. K. y K. Baskar, "Reciclaje de residuos plásticos electrónicos como material de construcción en países en desarrollo," *Rev. Ciclos Mater. y gestión residuos*, vol. 17, pp. 718–724, 2015.
- [226] K. Senthil Kumar and K. Baskar, "Briefing: Shear strength of concrete with E-waste plastic," *Proc. Inst. Civ. Eng. - Constr. Mater.*, vol. 168, no. 2, pp. 53–56, Apr. 2015, doi: 10.1680/coma.14.00044.
- [227] N. S. Lakshmi R., "Estudios sobre hormigón que contiene residuos de plasticos E.," *Rev. Int. Ciencias Ambient.*, vol. 1, no. 3, 2010.
- [228] A. Popovici *et al.*, "Modern mortars with electronic waste scraps (glass and plastic)," *Mater. Plast.*, vol. 52, no. 4, pp. 588–592, 2015.
- [229] M. A. ; G. G. ; y S. D. Fahad K. Alqahtani ; M. Iqbal Khan, "Producción de áridos plásticos reciclados y su utilización en hormigón," *Rev. Mater. en Ing. Civ.*, vol. 29, no. 4, 2017.
- [230] X. Wang, X. Hu, H. Zhang, F. Chang, and Y. Luo, "Photolysis Kinetics, Mechanisms, and Pathways of Tetrabromobisphenol A in Water under Simulated Solar Light Irradiation," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 49, no. 11, pp. 6683–6690, Jun. 2015, doi: 10.1021/acs.est.5b00382.
- [231] L. E. Peisino, M. Gómez, J. Kreiker, R. Gaggino, and M. Angelelli, "Metal leaching analysis from a core-shell WEEE plastic synthetic aggregate," *Sustain. Chem. Pharm.*, vol. 12, 2019, doi: 10.1016/j.scp.2019.100134.
- [232] M. Gómez *et al.*, "Stabilization of hazardous compounds from WEEE plastic: Development of a novel core-shell recycled plastic aggregate for use in building materials," *Constr. Build. Mater.*, vol. 230, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116977.
- [233] R. Lakshmia and S. Nagan, "INVESTIGATIONS ON DURABILITY CHARACTERISTICS OF E-PLASTIC WASTE INCORPORATED CONCRETE," *ASIAN J. Civ. Eng. (BUILDING HOUSING)*, vol. 12, no. 6, pp. 773–787, 2011.
- [234] R. G. y K. B. K. Senthil Kumar, "Evaluación de metales pesados en lixiviados de hormigón hechos con plástico de desechos electrónicos," *Adv. Civ. Eng. Mater.*, vol. 5, no. 1, pp. 256–262, 2016.
- [235] Å. Bergman *et al.*, "A novel abbreviation standard for organobromine, organochlorine and organophosphorus flame retardants and some characteristics of the chemicals," *Environ. Int.*, vol. 49, pp. 57–82, 2012, doi: 10.1016/j.envint.2012.08.003.
- [236] IRAM, "IRAM 50000 Cemento Cemento para uso general Composición, características, evaluación de la conformidad y condiciones de recepción," 2000.
- [237] BSI, "BSI. 2011. 'BS:EN:413-1:2011 Masonry Cement Part 1: Composition, Specifications and

Conformity Criteria.," 2011.

- [238] European Standarts, *EN 413-1:2011 Masonry cement. Composition, specifications and conformity criteria*. 2011.
- [239] S. Paria and P. K. Yuet, "Solidification-stabilization of organic and inorganic contaminants using portland cement: A literature review," *Environ. Rev.*, vol. 14, no. 4, pp. 217–255, 2006, doi: 10.1139/A06-004.
- [240] ASTM, "ASTM D 4607. 'Standard Test Method for. Determination of Iodine Number of Activated. Carbon,'" 2006.
- [241] A. Mianowski, A., Owczarek, M., & Marecka, "Surface area of activated carbon determined by the iodine adsorption number.," *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.*, vol. 29, no. 9, pp. 839–850, 2007.
- [242] C. S. Montesinos, "Caracterización de carbón activado a partir de bambú 'guadua angustifolia kunth' utilizando el método químico," pp. 10–12, 2019.
- [243] IRAM, "IRAM 1601: Agua para morteros y hormigones de cemento Portland.," 2012.
- [244] B. J. y K. A. Birchall James Derek, Howard AJ, "Sobre la hidratación del cemento Portland," *Proc. R. Soc. Lond. A*, vol. 360, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1098/rspa.1978.0078>.
- [245] L. P. and L. J. Zhou Y., "Application of natural biosorbent and modified peat for bisphenol a removal from aqueous solutions," *Carbohydr. Polym*, vol. 88, pp. 502-508., 2012, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.12.034>.
- [246] M. Gómez *et al.*, "Stabilization of hazardous compounds from WEEE plastic : Development of a novel core-shell recycled plastic aggregate for use in building materials," vol. 230, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116977.
- [247] Instituto Argentino de Normalización y Certificación, *IRAM 11559 "Acondicionamiento térmico. Determinación de la resistencia térmica y propiedades conexas en régimen estacionario. Método de placa caliente con guarda."* 1995.
- [248] Y. Xu and D. D. L. Chung, "Effect of sand addition on the specific heat and thermal conductivity of cement," *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, no. 1, pp. 59–61, 2000, doi: 10.1016/S0008-8846(99)00206-9.
- [249] C.-I.- INPRES, *Reglamento Argentino para construcciones sismorresistentes. Parte III Construcciones de mampostería*. 2018, p. 73.
- [250] J. G. Punzano, "Empleo de adsorbentes como aditivos en cementos: caracterización y aplicaciones en la eliminación de contaminantes ambientales (Ph.D. thesis).," Universidad de Oviedo, 2014.
- [251] M. Hewlett, P., & Liska, *Lea's chemistry of cement and concrete.*, Butterwort. 2019.
- [252] 2003 Annual Book of ASTM Standards, *ASTM C 293 - 02*. 2002.
- [253] IRAM, "IRAM 1871: Método de ensayo para determinar la capacidad y la velocidad de succión capilar de agua del hormigón endurecido." 2004.
- [254] A. Fernández Cañete, "Estudio de la Hidrofobicidad y Autolimpieza en Materiales con Nanotratamientos Superficiales," *Univ. Autònoma Barcelona*, pp. 1–73, 2013, [Online]. Available: [https://ddd.uab.cat/pub/trerecpro/2013/hdl\\_2072\\_234675/PFC\\_AgustinFernandezCanete.pdf](https://ddd.uab.cat/pub/trerecpro/2013/hdl_2072_234675/PFC_AgustinFernandezCanete.pdf).
- [255] IRAM, "Norma IRAM 12586 'Ladrillos y bloques cerámicos para la construcción de muros. Método de ensayo de resistencia a la compresión,'" 2004.

- [256] IRAM, "IRAM 11561-1: Bloques de hormigón.," 2019.
- [257] Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, "Manual de implementación de Análisis de Ciclo de Vida en la construcción," pp. 1–56, 2012, [Online]. Available: [https://www.oneplanetnetwork.org/sites/default/files/manual\\_implementacion\\_metodologia\\_acv.pdf](https://www.oneplanetnetwork.org/sites/default/files/manual_implementacion_metodologia_acv.pdf).
- [258] IRAM-ISO, *IRAM-ISO 14040 Gestión Ambiental - Análisis de Ciclo de Vida - Marco de Referencia*. 2006.
- [259] C. Arena, A.P., Correa, E.N., de Rosa, "ESTUDIO DE LAS IMPLICANCIAS AMBIENTALES RELACIONADAS CON LA CONSTRUCCIÓN Y USO DE DISTINTOS PAVIMENTOS PEATONALES EN ZONAS RESIDENCIALES DE LA CIUDAD DE MENDOZA," *Av. en Energías Renov. y Medio Ambient.*, vol. 7, 2003.
- [260] C. Arena, A.P., Correa, E.N., de Rosa, "Perfil Ambiental Del Cemento Pórtland Producido En La Región Oeste Argentina, Según La Metodología Del Ippc.," *Av. en Energías Renov. y Medio Ambient.*, vol. 6, pp. 47–52, 2002.
- [261] T. Ding, J. Xiao, and V. W. Y. Tam, "A closed-loop life cycle assessment of recycled aggregate concrete utilization in China," *Waste Manag.*, vol. 56, pp. 367–375, 2016, doi: 10.1016/j.wasman.2016.05.031.
- [262] J. Hong, W. Shi, Y. Wang, W. Chen, and X. Li, "Life cycle assessment of electronic waste treatment," *Waste Manag.*, vol. 38, no. 1, pp. 357–365, 2015, doi: 10.1016/j.wasman.2014.12.022.
- [263] S. M. Alston and J. C. Arnold, "Environmental impact of pyrolysis of mixed WEEE plastics part 2: Life cycle assessment," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 45, pp. 9386–9392, 2011.
- [264] Gobierno de España, *Real Decreto 27/2021 sobre pilas y acumuladores y la gestión ambiental sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos*. 2021, pp. 4851–4901.
- [265] S. N. M. Menikpura, A. Santo, and Y. Hotta, "Assessing the climate co-benefits from Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) recycling in Japan," *J. Clean. Prod.*, vol. 74, pp. 183–190, 2014, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.03.040.
- [266] A. Gutman, "El reciclado de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos ( RAEE ) como opción de reducción de emisiones de GEI," 2015.
- [267] J. Mendes Campolina, C. São Leandro Sigrist, J. M. Faulstich de Paiva, A. Oliveira Nunes, and V. A. da Silva Moris, "A study on the environmental aspects of WEEE plastic recycling in a Brazilian company," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 22, no. 12, pp. 1957–1968, 2017, doi: 10.1007/s11367-017-1282-2.
- [268] K. D. Royer S-J, Ferrón S, Wilson ST, "Production of methane and ethylene from plastic in the environment," *PLoS One*, pp. 1–13, 2018.
- [269] C. Clarke, I. D. Williams, and D. A. Turner, "Evaluating the carbon footprint of WEEE management in the UK," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 141, no. November 2018, pp. 465–473, 2019, doi: 10.1016/j.resconrec.2018.10.003.
- [270] J. Park, I. Jung, W. Choi, S. O. Choi, and S. W. Han, "Greenhouse gas emission offsetting by refrigerant recovery from WEEE: A case study on a WEEE recycling plant in Korea," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 142, no. December 2018, pp. 167–176, 2019, doi: 10.1016/j.resconrec.2018.12.003.
- [271] Organización Internacional del Trabajo, *Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) y empleo en la Argentina*. 2020.
- [272] María Paola Acosta Mejía Tutor:Tutor: Gilberto Martínez Arguelles Maestría, "Análisis del Ciclo de vida de la producción de agregado grueso natural y combinación natural/reciclado en Barranquilla. Caso de Estudio," Universidad del Norte, 2018.

- [273] C. A. Juan, "ARIDOS Y RECICLADOS Del yacimiento al despacho," *Rev. Hormigonar*, 2005.
- [274] G. M. Cuenca-Moyano, M. Martín-Morales, A. Bonoli, and I. Valverde-Palacios, "Environmental assessment of masonry mortars made with natural and recycled aggregates," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 24, no. 2, pp. 191–210, 2019, doi: 10.1007/s11367-018-1518-9.
- [275] M. U. Hossain, C. S. Poon, I. M. C. Lo, and J. C. P. Cheng, "Comparative environmental evaluation of aggregate production from recycled waste materials and virgin sources by LCA," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 109, pp. 67–77, 2016, doi: 10.1016/j.resconrec.2016.02.009.
- [276] S. Marinkovic, "Evaluación ambiental comparativa del concreto agregado natural y reciclado," *Waste Manag.*, vol. 30, 2010, doi: 10.1016/j.wasman.2010.04.012.
- [277] M. N. Wirtz, "agregado grueso reciclado - propuesta metodológica " Facultad de Ingeniería – Universidad de Buenos Aires," 2016.
- [278] E. Centre, "Ecoinvent database v2.2. Swiss center for life cycle inventories." 2010, [Online]. Available: <http://www.ecoinvent.org/database/>.
- [279] PRé Consultants, "SimaPro 8.0.2, LCA Software and Database Manual." 2014.
- [280] Ecoinvent, "Ecoinvent v3.0.1, Life cycle inventories of production systems. Swiss Centre for Life Cycle Inventories." 2014.
- [281] UNE, "UNE-EN 15804:2012+A1:2014 Sostenibilidad en la construcción. Declaraciones ambientales de producto. Reglas de categoría de producto básicas para productos de construcción." 2014.
- [282] H. R. et al Guinée JB, Gorrée M, *Handbook on life cycle assessment, operational guide to the ISO standards, I: LCA in perspective, IIa: guide, IIb: operational annex, III: scientific background.* 2022.
- [283] G. James e, "Principio de conservación de masas," *Natural gas measurement handbook*, 2006. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/conservation-of-mass-principle> (accessed Dec. 03, 2022).
- [284] L. E. P. Real, *Recycled Materials for Construction Applications.* 2023.
- [285] R. V. Anna Vilén, Panu Laurell, "Comparative life cycle assessment of activated carbon production from various raw materials," *J. Environ. Manage.*, vol. 34, no. 116356, 2022.
- [286] and A. R. S. Croteau, M., S. N. Luoma, "Trophic transfer of metals along freshwater food webs: Evidence of cadmium biomagnification in nature.," *Limnol. Ocean.* 50, vol. 5, pp. 1511–1519, 2005.