

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES

FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRÍA EN TECNOLOGÍA Y CONSTRUCCIONES DEL
HORMIGÓN

ANÁLISIS PROSPECTIVO DE LOS HORMIGONES
CON AGREGADOS RECICLADOS

María Gabriela Durán

Luis A. Godoy
Director

Diciembre 2008

*A Sofía y Federico
con amor*

Agradecimientos

Al Dr. Luís Godoy por brindarme dedicación, motivación, paciencia y experiencia, para desarrollar este trabajo.

Al Profesor Consulto Ingeniero Hugo Cúneo Simian por el continuo afecto recibido y las enseñanzas sobre tecnología del hormigón.

Al Dr. Aquiles Gay por su entusiasmo y las continuas discusiones sobre tecnología.

Indice

Capitulo 1	Definición del problema	
1.1.	Objetivos	10
1.2.	Contenidos	11
1.3.	Referencias	11
Capitulo 2	Revisión de la literatura	
2.1.	Introducción	12
2.2.	Hormigones con agregados reciclados	12
2.2.1.	Concepto de hormigones con agregado reciclado	12
2.2.2.	Antecedentes	12
2.2.3.	Propiedad de los agregados reciclados	14
2.2.4.	Propiedad de los hormigones con agregados reciclados	14
2.3.	Prospectiva tecnológica	16
2.3.1.	Concepto de prospectiva tecnológica	16
2.3.2.	Antecedentes	18
2.3.3.	Términos relacionados con la prospectiva	24
2.3.4.	Metodologías	26
	2.3.4.1. Método de los escenarios	29
	2.3.4.1.1. Método de los escenarios con un enfoque exploratorio.	31
	2.3.4.1.2. Método de los escenarios con un enfoque normativo.	32
2.4.	Dinámica de sistemas	33
2.4.1.	Concepto de sistemas	33
2.4.2.	Antecedentes	34
2.4.3.	Elementos básicos del lenguaje sistémico	35
2.4.4.	Estructuras complejas de realimentación	41
2.4.5.	Diagramas de Forrester	45
2.4.6.	Consideraciones generales del diagrama de Forrester	51
2.4.7.	Simulación computacional de la dinámica de sistemas	51
2.5.	Referencias	51
Capitulo 3	Metodología	
3.1.	Etapa normativa	55
3.1.1.	Ambiente	56
3.1.2.	Residuos de hormigón	56
3.1.3.	Agregados reciclados y hormigones con agregados reciclados.	56
3.2.	Etapa definicional	56
3.2.1.	Subsistema desarrollo y adopción	56
	3.2.1.1. Desarrollo	57

	3.2.1.2. Adopción	57
3.2.2.	Subsistema productor	60
	3.2.2.1. Productores de hormigón	60
	3.2.2.2. Productores de agregados	64
3.2.3.	Subsistema obras de hormigón	65
	3.2.3.1. Consumidores de hormigón	65
	3.2.3.2. Demolidores de obras de hormigón fuera de servicio	66
3.3.	Etapa de confrontación	66
3.4.	Etapa de determinación estratégica y factibilidad	67
3.4.1.	Subsistema desarrollo y adopción	68
3.4.2.	Subsistema productor	68
	3.4.2.1. Productores de agregados	68
	3.4.2.2. Productor de hormigones con agregados reciclados	79
3.4.3.	Subsistema obras de hormigón	87
3.5.	Referencias	91

Capitulo 4 Modelo

4.1.	Introducción	93
4.2.	Modelo de difusión de los hormigones con agregados reciclados	93
4.2.1.	Subsistema desarrollo y adopción	93
4.2.2.	Subsistema productor	95
4.2.3.	Subsistema obras de hormigón	98
4.3.	Validación del modelo	101
4.3.1.	Simulación del periodo comprendido entre los años 1999 a 2002	103
	4.3.1.1. Consideraciones para el análisis histórico.	103
	4.3.1.2. Consideraciones para las variables del modelo	105
	4.3.1.2.1. Subsistema desarrollo y adopción	105
	4.3.1.2.2. Subsistema Productor	105
	4.3.1.2.3. Subsistema obras de hormigón	107
	4.3.1.3. Resultados de la simulación para el periodo comprendido entre los años 1999 y 2002	107
4.3.2.	Simulación del periodo comprendido entre los años 2002 a 2007	111
	4.3.2.1. Consideraciones para el análisis histórico.	111
	4.3.2.2. Consideraciones para las variables del modelo	111
	4.3.2.2.1. Subsistema desarrollo y adopción	111
	4.3.2.2.2. Subsistema Productor	112
	4.3.2.2.3. Subsistema obras de hormigón	113
	4.3.2.3. Resultados de la simulación para el periodo comprendido entre los años 2002.-2007	115
4.4.	Simulación periodo comprendido entre 1999 -2007 con aceptación de los HAR	117
4.5.	Consideraciones finales	118
4.6.	Referencias	118

Indice

Capitulo 5	Aplicación del modelo al problema	
5.1.	Introducción	119
5.2.	Escenario tendencial	119
5.2.1.	Subsistema desarrollo y adopción	119
5.2.2.	Subsistema productor	120
5.2.3.	Subsistema obras de hormigón	121
5.2.4.	Resultados de la simulación	122
5.3	Escenario pesimista	124
5.3.1.	Subsistema desarrollo y adopción	124
5.3.2.	Subsistema productor	124
5.3.3.	Subsistema obras de hormigón	125
5.3.4.	Resultados de la simulación	126
5.4	Escenario optimista	127
5.4.1.	Subsistema desarrollo y adopción	127
5.4.2.	Subsistema productor	128
5.4.3.	Subsistema obras de hormigón	129
5.4.4.	Resultados de la simulación	129
5.5.	Comparación de los distintos escenarios	132
5.6	Escenario tendencia con un alcance temporal de 50 años	133
5.7.	Consideraciones finales	135
5.8.	Referencias	137
Capitulo 6	Conclusiones y líneas futuras de investigación	
6.1.	Resumen de los principales desarrollos de esta tesis	138
6.2.	Conclusiones	138
6.3.	Posibles líneas de trabajos futuros	142
Anexo		

Capítulo 1

Definición del problema

El presente trabajo está encaminado a analizar la convergencia de dos temas hormigones con agregados reciclados y análisis prospectivo del hormigón con agregados reciclados. Esta convergencia permite el estudio de la introducción de una innovación como es, los hormigones con agregados reciclados en el mercado específico de la construcción.

El desarrollo tecnológico del hormigón y aspectos económicos vinculados a la construcción, han convertido al hormigón en el material más utilizado en la construcción de obras civiles y de arquitectura de gran volumen en todo el mundo. A título de ejemplo en los últimos 10 años en la Argentina, la producción mensual promedio de cemento¹ fue de 506.731 Tn, estimándose la producción mensual aproximada de hormigón 1.447.802 m³, de los cuales un gran volumen se produce en plantas de hormigón elaborado.

Investigaciones realizadas por Hornung² y experiencias y entrevistas realizadas por la autora, sobre la generación de residuos en la industria del hormigón estiman que el volumen de residuos de hormigón en plantas de hormigón elaborado es aproximadamente equivalente al 2% ó al 3% de la producción, lo que implica que en los últimos años esta industria generó un volumen de desechos de aproximadamente 29.000 m³/mensuales. Muchas veces se pueden observar ese tipo de desechos de hormigón en terrenos lindantes a los predios de las plantas elaboradoras de hormigón o sus propios terrenos, como se observa en la figura 1.1.

En la ciudad de Córdoba el volumen de hormigón elaborado mensual promedio en el corriente año es de aproximadamente 4.500 m³ y la generación de residuos de hormigón estimada, producto de esta industria es de 1.080 m³ anuales. Otra fuente importante de generación de desechos de hormigón es la demolición de obras que han finalizado su vida útil o que se encuentran dañadas

figura 1.2. A título de ejemplo, en los últimos años el Area de Obras Viales de la Municipalidad de Córdoba demolió entre 4.000 y 10.000 m³ de calzadas de hormigón.



Figura 1.1: Desechos de hormigón en planta de hormigón elaborado.



Figura 1.2: Demolición de calzada.

Si bien la región de Córdoba es un centro importante de producción de agregados para hormigón en el país, la falta de políticas de explotación con criterios holístico, generan daños al medio ambiente por la extracción de agregados, sobre todo alterando la flora, la fauna, cuencas hídricas etc., como se observa en las Figuras: 1.3, 1.4, 1.5 y 1.6. También se producen efectos negativos en términos económico en las zonas turísticas por el impacto visual asociado a la extracción de agregados.

La explotación de canteras genera residuos constituidos por los materiales que hay que remover para acceder a los recursos minerales, como suelo vegetal, terrenos de recubrimiento y roca estéril, así como las escombreras que quedan

una vez extraído el mineral. El suelo vegetal es la capa superficial de la tierra en el emplazamiento de la explotación. Los terrenos de recubrimiento y la roca estéril son lo que se remueven para acceder al yacimiento. El tamaño de la roca estéril varía desde partículas pequeñas hasta peñas. La roca estéril puede servir para rellenar zonas excavadas con anterioridad o transportarse fuera del emplazamiento para utilizarla en obras de construcción. No obstante, en la práctica la mayoría de las rocas estériles que se generan se depositan en pilas cerca del establecimiento.

Los impactos medioambientales asociados a los residuos de las industrias de extracción de agregados, de la producción de hormigón, como de los escombros de construcciones de hormigón, incluyen aspectos relacionados con la ocupación del suelo, la calidad de las aguas superficiales y subterráneas, la estabilidad física, el polvo, la erosión y la calidad de los hábitats. Estos efectos pueden tener consecuencias medioambientales y socioeconómicas a largo plazo extremadamente difíciles de resolver precisando medidas correctoras de elevado costo. En este contexto, una de las tecnologías que puede cumplir un gran rol positivo en la reducción del impacto ambiental es la del reciclado del hormigón³.



Figura 1.3: Laguna artificial producto de la explotación de cantera.

La propuesta de esta tesis se orienta a la conservación de los recursos, reduciendo la presión sobre la explotación de materiales naturales vírgenes y disminuyendo el volumen de residuos.

Con frecuencia se emplea el hormigón en situaciones en las que, una falla del material para cumplir con determinados criterios de diseño, puede acarrear responsabilidades de tipo legal. Esta es una de las razones por la cual productores, usuarios y diseñadores, son reticentes a cambiar procesos, tradicionales, materiales ya aprobados, o adoptar innovaciones. La tecnología de

Capítulo 1

los hormigones con agregados reciclados enfrentan esas adversidades, que dificultan su difusión.



Figura 1.4: Cantera, frente de explotación.



Figura 1.5: Desechos de Cantera.



Figura 1.7: Cantera

El proceso productivo de las obras de hormigón puede considerarse como un conjunto de actividades que comprenden proyecto, construcción, mantenimiento y reciclado finalizada la vida de servicio. Con esta visión, se contempla el hormigón reciclado, una vez finalizada la etapa de servicio, como material para ser incluido en un nuevo ciclo constructivo. Esto implica introducir un valor agregado al material, tanto en términos de minimizar el impacto ambiental provocado por la explotación de canteras para la producción de agregados, como el impacto generado por los residuos de la estructura una vez terminada su vida de servicio. Esta visión innovadora involucra no solo aspectos concernientes a la tecnología del hormigón con agregados reciclados, sino que también incluye aspectos económicos, culturales y medio ambientales, vinculados a la industria del hormigón.

Existen perspectivas de cambio como el expuesto por el comité “Strategic Development Council” del American Concrete Institute que elaboró un documento denominado *Vision 2030: A vision for U.S. Concrete Industry*⁴, como resultado de un taller integrado por más de 50 ejecutivos, presidentes, representantes de organismos gubernamentales e investigadores, vinculados a la industria del hormigón en Estados Unidos. El documento describe ocho áreas en las que se requieren investigaciones, con el objeto de lograr la visión de la industria para el año 2030. Las áreas pueden resumirse de la siguiente forma:

- Mejoras en el proceso: *“Una variedad de subproductos de otras industrias al igual que el hormigón reciclado se utilizarán como componentes en la producción de hormigón”.*
- Comportamiento del producto: Se requiere mejoras en las prestaciones del hormigón.
- Ahorro de energía: *“Existen oportunidades para reducir el costo de la energía a través del ciclo de vida útil de los productos de hormigón: en la fabricación del cemento, transporte, colocación, mantenimiento, y reparación, demolición y evacuación de desechos”.*
- Comportamiento en relación al medio ambiente: *“La industria continuará realizando esfuerzos para utilizar subproductos y productos de desechos de la industria del hormigón. Hacia el 2030 logrará eliminar totalmente los desechos provenientes del hormigón y de sus constituyentes”*
- Transferencia tecnológica: *“Normalmente, demora más de 15 años para que una nueva tecnología del hormigón ingrese en el mercado. Hacia el año 2030, la industria reducirá el tiempo necesario para que una nueva tecnología sea aceptada en el mercado”.*
- Mejoras Institucionales: Para optimizar las tecnologías gestionales.
- Educación y empleo. En el área de la tecnología del hormigón.
- Imagen de la industria: Mejora de la imagen de la industria en toda la sociedad.

Con relación a esta propuesta de trabajo se pueden destacar los siguientes objetivos de visión 2030:

- *La industria del hormigón continuará realizando esfuerzos para utilizar subproductos y productos de desechos, de la industria del hormigón y de otras, en la fabricación del hormigón. Hacia el 2030, logrará eliminar totalmente los desechos provenientes del hormigón y de sus constituyentes.*
- *Normalmente, demora más de 15 años para que una nueva tecnología del hormigón ingrese en el mercado. Hacia el año 2030, la industria reducirá el tiempo necesario que una nueva tecnología sea aceptada en un periodo de dos años en el mercado.*

La preocupación de la *American Concrete Institute* por el futuro de la industria y de la tecnología del hormigón es compartida por sectores privados y públicos; por esto, desde hace aproximadamente una década, los principales países industrializados han comenzado a realizar previsión o prospectivas tecnológicas conocidos en inglés como *“Technology foresight”** con el objeto de conocer tecnologías apropiadas para el desarrollo, cómo estas tecnologías

interactúan con la sociedad y cuáles pueden ser los factores que afecten en un sentido o en otro el crecimiento y/o la difusión.

Dada esta compleja situación, la pregunta que motiva esta investigación se puede enunciar como:

¿Cuáles son las partes del sistema tecnológico - social - económico que influyen en forma positiva o negativa para la difusión de los hormigones con agregados reciclados en Córdoba?

Si bien existen numerosos trabajos desarrollados y en desarrollo sobre la tecnología de los hormigones con agregados reciclados y sobre análisis prospectivos de tecnologías, no se han encontrado antecedentes sobre el análisis tecnológico y prospectivo de hormigones con agregados reciclados, por lo menos en el ámbito de Argentina.

1.1. Objetivos

El objetivo general consiste en detectar, a través de un análisis prospectivo normativo, cuáles son los factores cruciales en el mercado de Córdoba que favorecerían la difusión de los hormigones con agregados reciclados.

Mediante conclusiones derivadas de simulaciones computacionales, el trabajo trata de aportar elementos para la inserción en el medio, de la tecnología de los hormigones con agregados reciclados, colaborar con la disminución de explotación de canteras y de desechos provenientes de la industria del hormigón además de mejorar la capacidad de decisión frente a nuevas tecnologías en el campo de los materiales de uso ingenieril.

Los objetivos específicos son:

- Identificar características tecnológicas de los hormigones con agregados reciclados que lo fortalecen o debilitan como material para la utilización en obras de ingeniería y arquitectura.
- Desarrollar un modelo que permita la simulación de la difusión de los hormigones con agregados reciclados.
- Formular las acciones a realizar para disminuir el tiempo en que una nueva tecnología como la de los hormigones con agregados reciclados ingrese en el mercado.

1.2. Contenidos

La tesis se estructura en seis capítulos, en éste primero se define el problema y se describen los objetivos generales y específicos de este trabajo.

Capítulo 1

En el capítulo 2 se plantea la revisión literaria de los tres campos que contempla esta tesis: prospectiva de la tecnología, dinámica de sistemas y hormigones con agregados reciclados.

En el capítulo 3 se explicitan las metodologías que se usaron para realizar el análisis prospectivo, caracterizar los agregados y los hormigones con agregados reciclados.

En el capítulo 4 se muestra el modelo que utiliza la dinámica de sistemas para simular la difusión del hormigón con agregados reciclados (HAR) y con el objeto de validarlo, se simulan dos periodos históricos.

El capítulo 5 muestra la aplicación del modelo para simular tres escenarios, uno tendencia actual, otro pesimista y por último uno optimista para la difusión de los HAR.

Finalmente el capítulo 6 está dedicado a las conclusiones extraídas de este trabajo y a la propuesta de posibles líneas de investigaciones futuras.

1.3. Referencias

¹ <http://afcp.org.ar/2005>. Asociación de Fabricantes del Cemento Portland AFCP.

² Hornung F. (2002). "Reciclado de hormigón residual en plantas de hormigón elaborado" E. Schwenk Zementwerke, Alemania.

³D. Philipsen *et al.* (2002). "Assessing the environmental potential of clean material technologies", Institute for prospective technological studies, Project managers and editors at IPTS: Peter Eder y Oliver Wolf. Report EUR 20515 EN

⁴ Plenge W. H. (2001). "Vision 2030: Our Industry's 30- Year Map to the Future". Concrete International, Vol. 23, N° 3, Pág. 25 -34.

Capítulo 2

Revisión de la literatura

2.1. Introducción

En este capítulo se realiza una revisión de la literatura relacionada a los tres campos que vincula esta tesis: hormigones con agregados reciclados, prospectiva tecnológica y dinámica de sistemas.

2.2. Hormigones con agregados reciclados

2.2.1. Concepto de hormigones con agregados reciclados

El hormigón es un material compuesto por una pasta de cemento y agua con agregados gruesos y finos que en estado fresco presenta cohesión y trabajabilidad, y que luego del fraguado y endurecimiento de la pasta cementicia, adquiere resistencia. Además de estos componentes, también puede contener aditivos químicos y/o adiciones minerales pulverulentas.

La RILEM¹ clasifica Los agregados reciclados (AR) en función de su origen como: Tipo I), constituidos principalmente de desechos de mampostería o ladrillos. Tipo II), constituido por desechos de hormigón (armado o sin armar) y Tipo III), constituidos por desechos de hormigón y agregados naturales. El método básico para la obtención de agregados reciclados del Tipo II es triturar los restos de demoliciones de estructuras de hormigón para obtener un producto granular que suele tener un mortero adherido que se designa como mortero original. El hormigón con agregados reciclados debido a las particularidades de sus propiedades es considerado como un nuevo hormigón.

En el presente trabajo, se analizan los hormigones con agregados gruesos reciclados y no aborda la problemática de los agregados finos reciclados.

2.2.2. Antecedentes

En Europa, los trabajos de investigación relacionados con la utilización de hormigones con agregados reciclados (HAR) comenzaron a realizarse después de la segunda guerra mundial, especialmente en Alemania. El comité técnico 37 – DRC de la Unión Internacional de Pruebas de Laboratorios de Investigación para los Materiales (RILEM) elaboró el primer informe sobre el estado del arte de los hormigones reciclados, cubriendo el periodo comprendido entre los años 1945 a 1977. Hansen² elaboró el segundo y el tercer informe de la RILEM sobre el estado del arte, abarcando los periodos comprendidos entre 1978 – 1985 (segundo informe) y desde 1985 hasta 1989 en el tercer informe. En este último informe de RILEM, se incluyen aspectos vinculados a la producción y características de los agregados reciclados, propiedades mecánicas y de durabilidad de los hormigones con agregados reciclados, forma de producción de los HAR y el estado de normas, códigos y métodos de ensayos en distintos países como Estados Unidos, Japón y los países europeos.

Gomez Soberón³ realizó una revisión del contexto normativo para agregados reciclados, en la que se destacan las normativas de países como Inglaterra, en el cual la utilización de agregados reciclados para hormigones está contemplado por la normativa BS6543 “Agregados para hormigón”. En Japón, la ley de reciclado de desechos está en vigencia desde octubre de 1991, en Holanda no solo está normalizado el uso de agregados reciclados, sino que se comercializan bajo marcas establecidas como la Korrelmix⁴, que garantiza un nivel de calidad de éstos, basándose en la norma de calidad ISO 9002. Estados Unidos, al igual que Holanda tiene productores de hormigones con agregados reciclados⁵ y una base normativa como la ASTM C33-82, que en 1982 amplió las especificaciones de agregados para hormigón, incluyendo la posibilidad de utilizar agregados reciclados. El Cuerpo de Ingenieros del Ejército y la Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos, también contemplan esta posibilidad.

Desde finales del siglo XX, se comenzaron a realizar investigaciones sobre esta temática en distintos centros argentinos, especialmente en el Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMIT) con el objeto de determinar las características de los agregados reciclados y de los hormigones con agregados reciclados^{6,7,8,9,10 y 11} la difusión de cloruros en hormigones con agregados reciclados¹² y la evaluación de estos hormigones mediante métodos vibratoriales con dos ensayos no destructivos, el de ultrasonido y el de frecuencia de resonancia¹³.

En Córdoba, Durán y Cúneo¹⁴ comenzaron investigaciones sobre hormigones con agregados reciclados a principios de los años 90 con el objeto de determinar la factibilidad técnica de producir estos hormigones en la región.

Con el objeto de difundir su utilización, se incorporó la posibilidad de utilizar agregados reciclados para la elaboración del hormigón, en contextos normativos, como el proyecto de pliego general de especificaciones técnicas para la recepción de hormigones normales para la Municipalidad de Córdoba¹⁵, que posteriormente fue aprobado por las autoridades Municipales y el pliego general de especificaciones técnicas particulares para las obras de hormigones

de la empresa CTI Móvil¹⁶. También se ha analizado la posibilidad de hacer la producción en plantas industriales de los hormigones con agregados gruesos reciclados dentro del marco de la norma IRAM 30100, "Guía de interpretación de la IRAM-ISO 9001:2000 en la construcción"¹⁷.

Las investigaciones anteriormente citadas y otras analizadas^{18,19,20 y ,21} concuerdan en relación a las propiedades de los AR y de los HAR que se describen a continuación.

2.2.3. Propiedades de los agregados reciclados

Los agregados gruesos reciclados por efecto del mortero original (MO) adherido, tienen las siguientes particularidades:

- Granulometría: es semejante a la de los agregados de origen, aunque suelen ser un poco más grande por efecto del MO lo que incrementa el módulo de fineza.
- Forma y la textura: en general son más lajosos y alargados, con una textura más rugosa que los agregados originales.
- Densidad relativa: Es menor que la del agregado de origen en un orden del 5% al 10%, por efecto del MO adherido.
- Absorción de agua: Esta es una de las propiedades que más difiere del agregado original y puede ser de 2,5 a 8,5 veces mayor.
- Desgaste de los ángeles: también resulta mayor que la del agregado original.
- En relación a la reacción álcalis-agregado no se posee una metodología para la evaluación del poder reactivo residual del agregado.

2.2.4. Propiedades de los hormigones con agregados reciclados

En relación a las propiedades de los hormigones con agregados reciclados es necesario considerar que éstas difieren del hormigón original o del patrón en relación a:

- El porcentaje de reemplazo de los agregados naturales por agregados reciclados que se realice. Según la revisión realizada, la diferencia en el comportamiento de los hormigones se percibe cuando el porcentaje de reemplazo es superior al 30%.
- La calidad del hormigón y del agregado original.

Capítulo 2

En función de estas consideraciones, las propiedades del hormigón pueden atenuarse o acentuarse.

En el análisis de literatura especializada no se encontró un método particular para la dosificación de hormigones con agregados reciclados, en línea general se realiza una dosificación racional con las mismas consideraciones que para un hormigón normal y luego se emplean pastones de prueba para ajustar los parámetros de diseño. Tampoco se encuentran unanimidad de criterio para la etapa de mezclado, algunos autores recomiendan colocar los AR, secos y otros pre humedecer los AR antes del mezclado.

Las propiedades en estado fresco de los HAR (cuando tienen un porcentaje de reemplazo de agregado natural por agregado reciclado relevante) con respecto a los hormigones con los agregados naturales; pueden sintetizarse como:

- Para igual asentamiento requieren más agua los HAR que los hormigones con agregados naturales, esto se debe al mortero adherido, a la forma y la textura del agregado reciclado.
- Gómez Soberón² señala que dada la absorción de los AR, los hormigones presentan menor velocidad de exudación.
- La densidad del hormigón fresco resulta levemente menor, en aproximadamente un 5%, que la del hormigón patrón, como consecuencia de la disminución de densidad de los AR.
- El contenido de aire en las mezclas aumenta cuando se incrementa el reemplazo de agregado.

Para comprender las propiedades de los HAR endurecidos, se los puede considerar como un sistema compuesto por cuatro componentes: el mortero nuevo, el mortero original, la interfase y el agregado original. En consecuencia las propiedades del sistema dependerán de las propiedades de los componentes y de la interacción de las mismas.

Las propiedades del hormigón en el estado endurecido de los HAR (cuando tienen un porcentaje de reemplazo de agregado natural por reciclado relevante) con respecto a los hormigones con los agregados naturales de origen son:

- La resistencia a compresión simple puede estar en un rango entre el 60 al 100% de la del hormigón de referencia. Algunas investigaciones²² muestran que cuando el factor de reemplazo (definido como la relación entre agregado reciclado dividido la suma de agregado reciclado más el agregado natural) en peso es menor a 0,30 la resistencia a la compresión simple puede alcanzar valores semejante a los testigos.

- Di Maio *et al.*⁵ señalan que para valores de resistencia entre 11 Mpa y 29 Mpa existe correlación entre la relación a/c y resistencia, lo que pone de manifiesto que la adherencia que se produce entre los agregados reciclados y la nueva matriz tiene un comportamiento satisfactorio.
- Los valores de resistencia a tracción indirecta reportado son levemente inferiores a los de los hormigones testigos dentro del orden del 0% al 25%.
- La relación entre resistencia a tracción/resistencia a compresión se mantiene en forma similar a un hormigón normal.
- Zega¹² señala que para valores de resistencia a compresión similares se reportan menores valores de velocidad ultrasónica y de módulo de elasticidad dinámico.
- La contracción por secado puede ser mayor que la de los hormigones con agregados naturales.
- Los valores de fluencia son mayores que para los hormigones normales patrón y dentro de niveles de resistencia convencionales.
- La permeabilidad, que es una propiedad fundamental para la durabilidad es 2 a 5 veces mayor en los HAR.
- Durabilidad: dada la variación y cantidad de contaminantes podrían ser perjudiciales en términos de durabilidad, no se cuenta con resultados concluyentes y se requieren más estudios.
- Forster Stephen²⁰, señala que la resistencia a los ciclos de congelamiento y deshielo en los hormigones con agregados reciclados mejora.
- Los valores de módulo de elasticidad son del orden del 60 al 100% en relación a los valores de módulo de elasticidad de los hormigones con agregado natural patrón.

2.3. Prospectiva tecnológica

2.3.1. Concepto de prospectiva tecnológica

El incremento en las incertidumbres, la multiplicación de las interdependencias, la aceleración del cambio en algunos sectores (tecnológico, político, etc.) y la acentuación de las inercias en otros (demográfico, energético, sociocultural), son algunos de los factores que demandan para toda acción presente un esfuerzo de reflexión. En este contexto, la prospectiva constituye una reflexión sobre acciones presentes en función de futuros posibles, con el fin de determinar en un largo plazo cuáles podrían ser los escenarios: posibles,

realizables y/o deseables. Un escenario en el marco de la prospectiva no aspira a constituirse en una realidad futura, sino una representación de una posible realidad, utilizado para analizar el efecto de acciones presentes en función del abanico de futuros viables y/o deseables.

El análisis del futuro permite actuar en forma racional y la reflexión prospectiva permite ver el futuro en su complejidad y su movilidad, con sus riesgos y sorpresas.

La palabra prospectiva se deriva del verbo en latín *prospicere* o *prospectare*, que significa “mirar mejor y más lejos aquello que está por venir”, es decir la prospectiva está relacionada con el marco espacio-temporal.

Los estudios de prospectiva no pretenden pronosticar el futuro; parten del supuesto de que no hay uno, sino varios futuros posibles. Abordar las diversas posibilidades y los caminos hipotéticos, constituye un punto de partida para los retos futuros. Entonces hacer prospectiva implica:

- Explorar la incertidumbre del futuro.
- Elaborar hipótesis razonadas, fuertemente sustentadas, con rigor en el método, el proceso y el contenido.
- Hablar en términos prospectivos no es soñar despierto, sino plantear alternativas transformadoras pero realizables.
- Elaborar hipótesis de futuros plausibles.
- Recordar que el fundamento no es buscar el criterio de verdad en la correspondencia entre el futuro y la realidad actual, sino estimular la capacidad de responder oportuna y efectivamente a circunstancias cambiantes.
- Proveer buenas respuestas con anticipación para cuando se presenten los problemas.

Según Porter *et al.*²³, un buen análisis prospectivo debe ser: creíble, útil para tomar decisiones, basarse en informaciones confiables, el método para procesar las informaciones debe describirse claramente y poder replicarse, lógicamente ser consistente, las suposiciones fundamentales deben definirse claramente y sostenerse, cuando sea apropiado puede cuantificarse usando las unidades pertinentes.

La prospectiva tecnológica focaliza la atención en la tecnología y se debe distinguir de otras en las cuales la tecnología juega un rol, pero no el rol central. Resulta útil para brindar información en los procesos de gerenciamiento de tecnología, identificar prioridades científicas y tecnológicas presentes, a la luz de hipotéticos futuros de desarrollos económicos, sociales, científicos y tecnológicos.

Los atributos de la tecnología que frecuentemente se abordan son:²³

- Crecimiento en función de la capacidad.
- Velocidad de reemplazo de una tecnología por otra nueva.
- Penetración en el mercado.

- Difusión.
- Probabilidad y oportunidad de innovaciones tecnológicas.

2.3.2. Antecedentes

Los estudios del futuro se inician en los años cincuenta y sesenta del siglo XX. La metodología más difundida era básicamente extrapolar, o prolongar en el futuro las situaciones del presente. La extrapolación se basaba en la idea que el estudio del pasado puede revelar el futuro a través del estudio científico, basado en la economía y las mutaciones sociales, tecnológicas y económicas. Después de la segunda guerra mundial el futuro significaba casi siempre “más innovación tecnológica, más crecimiento económico, más uso de energía”, etc. Un ejemplo de este tipo de estudios lo constituye el informe del MIT, "Límites al Crecimiento" 1972.

En la década de los años 70, existió un auge de métodos de pronósticos tecnológicos que incluyeron pronósticos puntuales o globales. Muchos de ellos cayeron en descrédito, algunos por pronosticar sin considerar el contexto y gran parte de ellos, porque no lograron pronosticar acontecimientos de importancia, tales como el surgimiento de la computadora personal o del fax, entre otros. Uno de los problemas de la metodología utilizada era no contemplar las mutaciones aceleradas y profundas de órdenes cualitativos que no son lineales ni continuos, las cuales muestran que las tendencias históricas pueden variar a veces en formas dramática. Al respecto, Medina Vásquez y Ortigón²⁴ señalan: “*Los fundamentos teóricos de la prospectiva fueron establecidos en los años sesenta en el medio de las empresas públicas francesas. Pierre Massé, uno de los pioneros de la prospectiva aplicada a la gestión pública en esta época, percibió que ésta implica una puesta en común de disciplinas de las ciencias sociales con un objeto propio: mirar más lejos, a más largo plazo, de forma más amplia y más profunda la realidad. Concibió a la prospectiva como una indisciplina intelectual, es decir, un cruce de disciplinas tales como la historia, la sociología, la política, la economía, la geografía, la antropología y la psicología. Su propósito no era generar miradas superficiales sino visiones transformadoras ancladas en la historia, que perciban el conjunto social, de manera global y sistémica. En el fondo se buscaba percibir la realidad de otra manera, esto es, producir una mirada seria y diversa hacia la innovación, hacia la creación de alternativas de futuro.*”

Hace aproximadamente una década, los principales países industrializados realizaron prospectivas tecnológicas (*Technology foresight*)^a, con el objeto de conocer tecnologías apropiadas para el desarrollo, investigando cómo estas tecnologías interactúan con la sociedad y cuáles

^a Numerosas publicaciones utilizan la expresión inglesa *Technology foresight*, que se puede traducir como “Previsión Tecnológica”, En las publicaciones de lengua española se traduce también como Prospectiva Tecnológica. La Real Academia Española, define como: **Pronóstico**, Señal por donde se conjetura o adivina algo futuro. **Prospectiva**, Conjunto de análisis y estudios realizados con el fin de explorar o de predecir el futuro, en una determinada materia.

pueden ser los factores que afecten en un sentido o en otro el crecimiento y/o la difusión.

En la década de los años 90 la prospectiva tomó un nuevo auge, las empresas comenzaron a realizar estudios de prospectiva con el objeto de planificar sus estrategias, se crearon centros de prospectivas tecnológicas tales como: el Observatorio de Prospectiva Tecnológica Industrial²⁵ que nace a finales de 1997, por iniciativa del Ministerio de Industria y Energía de España, en 1994 el *Institute for Prospective Technological Studies* IPTS²⁶, ubicado en Sevilla, que con siete instituciones científicas más, forman la unión de centros de investigación comunes, de la Comisión de las Comunidades Europeas, cuyo objetivo es propiciar un mejor entendimiento entre tecnología, economía y sociedad. La principal actividad es recoger información sobre progresos tecnológicos en el mundo, analizarla y transmitirla en forma procesada a los “fabricantes” de decisiones europeas.

En Argentina, los trabajos sobre Prospectiva Tecnológica comienzan a principio de los años 70, con el trabajo pionero de un grupo dirigido por Amílcar Herrera, quienes elaboraron el Modelo Bariloche que surgió como respuesta de un grupo de pensadores al mensaje contenido en el modelo propuesto por investigadores del MIT, que realizaron el informe "Límites al Crecimiento" (1972) que sostenía que los límites al crecimiento (extrapolando los índices de crecimiento) eran físicos y que la salida de un futuro catastrófico era a través de la reducción del crecimiento de la población y la restricción al crecimiento de la economía mundial. El modelo normativo (ya que definía un futuro deseable) denominado Modelo Mundial Latinoamericano (MMLA)²⁷ consistía en explorar la factibilidad de lograr un objetivo mínimo de bienestar general global, y verificar si esto no resultaba imposible debido a los límites impuestos por el agotamiento de recursos imprescindibles. La perspectiva teórica requerida para abordar la problemática planteada hacía necesario especificar adecuadamente qué concepción de la prospectiva era la más apropiada. El enfoque alternativo propuesto por el grupo dirigido por Amílcar Herrera se diferenciaba claramente de la metodología basada en proyecciones de tendencias que no contemplaban transformaciones de la estructura de poder existente en los 70, llevaba más bien, a apuntar a metas universales de equidad, a optar por una perspectiva alternativa de carácter normativo. Consecuentemente el grupo de la Fundación Bariloche consideró importante explicitar sus opciones teóricas y metodológicas, incluyendo los supuestos básicos. De esta manera se construyeron dos dimensiones del modelo:

- La primera, de carácter conceptual, sustantivo y lógico, que permitió establecer las características principales de la perspectiva teórica y de los aspectos normativos, incluyendo la sociedad meta, básicamente basada en la igualdad y la plena participación de todos los seres humanos en las decisiones sociales y con un nivel de consumo material y de crecimiento económico compatibles con el medio ambiente.
- La segunda, consistente en la construcción de un modelo formal, en donde la dimensión productiva creciera de acuerdo a una función de utilidad con sustitución de capital y trabajo, que llevara a la meta fijada de bienestar universal para la población mundial, definida en términos de satisfacción de necesidades básicas.

Para la construcción de dicho modelo se emplearon los métodos más avanzados disponibles entonces de la teoría de sistemas, estableciendo una función dinámica orientada por la satisfacción de un conjunto de necesidades básicas fundamentales respecto a las cuales ya existía en 1970 un consenso importante entre quienes trabajaban en problemas de esta índole. A partir de entonces el empleo de indicadores relacionados con la medición de la satisfacción de las necesidades básicas (alimentación, vivienda, educación y salud) –seleccionados y definidos de diversas formas–, no sólo en la construcción de modelos globales se fue generalizando. Su uso resultó de mucha utilidad para la definición de las llamadas líneas de pobreza así como para la formulación de políticas socioeconómicas o las más restrictivamente sociales. Es oportuno subrayar que a partir del trabajo de la Fundación Bariloche diversos enfoques teórico-metodológicos tomaron la noción de necesidades básicas desarrolladas en el Modelo Mundial Latinoamericano. Otra característica sumamente innovadora del Proyecto de la Fundación Bariloche, fue la de emplear como variable a optimizar en el procesamiento dinámico de la función de producción y distribución del modelo, la esperanza de vida al nacer. Luego de examinar una batería importante de variables utilizadas en los indicadores de desarrollo humano y social, se pudo confirmar que dicha variable era la más sensible a la inequidad, entre las comúnmente empleadas. En los modelos puramente económicos, donde lo social no está tomado en cuenta explícitamente, la variable que se optimiza es casi siempre el PBI. Otra innovación importante fue el construir el submodelo de población de tal manera que éste reflejara correctamente el impacto que, de acuerdo al estudio de múltiples experiencias históricas, tiene el aumento del bienestar de la población en la disminución de las tasas de crecimiento demográfico. Esto se verifica en general, a pesar de que la mejora en la satisfacción de las necesidades básicas, con su impacto en el bienestar de la población, contribuye a disminuir la mortalidad infantil y a prolongar la esperanza de vida al nacer. En el análisis de los obstáculos para alcanzar la sociedad meta, los autores sostienen que éstos son esencialmente sociopolíticos y relacionados con la distribución del poder, tanto en el ámbito internacional como dentro de cada país. El Modelo Mundial Latinoamericano consideró que la catástrofe que anunciaba el modelo del MIT en 1970 estaba ya instalada, dado que dos tercios de la humanidad se encontraban entonces sumergidos en la exclusión y la pobreza.

En el libro *¿Catástrofe o Nueva Sociedad? Modelo Mundial latinoamericano, 30 años después*, Ana Hardoy⁵, señala: “El llamado a la solidaridad global para una sociedad equitativa y participativa continúa sin respuesta. A la luz del tiempo transcurrido, y con el beneficio del conocimiento actual, el mensaje central del modelo todavía es válido.”

A diferencia de otros modelos globales computarizados, MMLA no se orientó a la predicción de las consecuencias de las tendencias actuales, sino a demostrar la viabilidad material de un futuro deseable. La demostración de la posibilidad de satisfacer necesidades básicas en un marco de restricciones en lo que concierne al medio ambiente constituyó una importante crítica a la predicción tipo fin del mundo del modelo “Los límites del crecimiento”. También mostró la utilidad de la noción de “necesidades básicas” como una manera de evaluar estrategias de desarrollo de largo plazo.

Michel Godet²⁸ distingue cuatro corrientes de prospectiva:

- **Posindustrial:** Aparece en los años sesenta, y se identifica con la idea de un cambio, especialmente tecnológico, que puede acelerarse y dominarse mediante la previsión y la planificación (determinismo tecnológico). La visión de esta corriente oscila entre el optimismo y el pesimismo.
- **Neomalthusiana:** marcada por el Club de Roma. Fundado en 1968, en Roma, por 35 personalidades de 30 países entre los que se contaban académicos, científicos, investigadores y políticos que compartían una creciente preocupación por las modificaciones del entorno ambiental. La técnica utilizada basada en la dinámica de los sistemas la desarrolló Jay Forrester en el MIT, actualmente miembro honorario del club. En el primer informe se afirmaba: *“el crecimiento exponencial no podía continuar; los recursos faltarían y el mundo se desplomaría bajo la presión demográfica”*, señalando que lo necesario era la regulación demográfica por parte de los gobiernos.
- **Teoría de los ciclos largos tecnológicos:** aparece a finales de los años 70 y se basa en explicar las oleadas sucesivas de expansión y de recesión con oleadas de innovación. Cada fase del ciclo de expansión y de recesión, según esta teoría, dura aproximadamente 25 años. Se basa en un determinismo exclusivamente tecnológico, que gobierna el desarrollo de las fuerzas productivas, las relaciones técnicas de producción, e incide sobre las relaciones sociales de producción y la superestructura político-cultural, sin perjuicio de que éstas condicionen también su desarrollo. Es decir el determinismo tecnológico busca las causas de los cambios sociales en algo dado, objetivo, material, en muchos casos cuantificable y que funciona como un factor independiente que actúa "desde fuera" de la sociedad sobre las variables dependientes (sociales), o incluso como "primer motor" del cambio social.
- **Teoría de las bifurcaciones y el caos determinista, pero fecundo:** Su origen se basa en los trabajos del matemático Poincaré (1889-1908), que demostraba que ciertos sistemas de ecuaciones paramétricas no tenían solución estable. En los años 70 Prigogine y Stengers desarrollaron los conceptos de orden de fluctuación y de caos fecundo, demostrando que lejos de las condiciones de equilibrio inicial aparecen bifurcaciones hacia otros equilibrios. Cerca de estos puntos críticos, algunas fluctuaciones débiles, internas o externas del sistema, pueden ser decisivas para ir hacia una u otra rama de la evolución. Transpuesta a los sistemas sociales, estas fluctuaciones débiles pueden ser, por ejemplo, perturbaciones aleatorias o acciones individuales. En relación con la prospectiva se realiza una lectura de los sistemas sociales a partir del análisis de la evolución de los sistemas físicos, conciliando por una parte el determinismo: el sistema tiene una historia que condiciona sus trayectorias (futuros) posibles y conduce a un diagrama de las

bifurcaciones, no a otro; y por otra parte, la libertad: en las zonas de bifurcaciones, algunas acciones insignificantes debidas al azar o a la voluntad pueden producir trastorno. Frente a los sistemas, los actores pueden esperar reconocer los parámetros de bifurcaciones y actuar por encima de ellos, con el riesgo de fluctuaciones peligrosas en estos puntos de bifurcaciones.

Para realizar prospectiva tecnológica es necesario comprender el proceso de crecimiento de la tecnología, Bright (1978) propuso un modelo que fue ampliado por Martino (1983)²³ y que se describe sintéticamente a continuación:

- 1° Etapa: Descubrimiento científico; determinación de la oportunidad o la necesidad.
- 2° Etapa: Demostración de la viabilidad en laboratorio.
- 3° Etapa: Operaciones de prototipos o ensayos de campo.
- 4° Etapa: Introducción comercial o uso operacional.
- 5° Etapa: Adopción en gran escala.
- 6° Etapa: Proliferación y difusión de otros usos.
- 7° Etapa: Efectos en el desarrollo social y/o importancia en la economía.

Algunas etapas del crecimiento tienden a comprimirse, pero el proceso general en total lleva 10 a 25 años o más. Observando la velocidad de los cambios en la tecnología de la información durante los años 80, se visualizó una rapidez en el crecimiento llegando en algunos casos a la madurez en periodos menores a los 10 años.

La representación en un gráfico cartesiano del consumo o adeptos en función del tiempo muestra las denominadas “curva de crecimiento”, muchas tecnologías se pueden modelar, realizando una vaga analogía con el crecimiento de sistemas biológicos por medio de una curva que toma la forma de una **S**, con un comienzo lento, luego un ascenso rápido y una disminución al final. Varios factores pueden producir variaciones en la forma de la curva.

En las curvas **S** de la figura 2.1 se muestran dos modelos de curva S, aplicada a la suscripción a la televisión por cable de hogares de los Estados Unidos. El modelo propuesto por Fisher-Pry es una curva con un comportamiento análogo al del crecimiento de los sistemas biológicos y la de Gompertz difiere levemente. En ambas se observa que el crecimiento en las etapas 2 y 3 suele ser suave y titubeante por problemas fundamentalmente de diseño y desarrollo. En la etapa de introducción comercial (etapa 4) las nuevas tecnologías suelen no exhibir una clara superioridad de desarrollo en relación a las tecnologías existentes. Al inicio algunos problemas de producción, suministro y mantenimiento pueden tener soluciones lentas y algunos aspectos de la tecnología vigente pueden mejorar, o los costos de la nueva tecnología pueden ser muy superiores. Si estos pasos se superan el crecimiento de la tecnología es rápido (etapas 4, 5 y 6).

Cuando la demanda de provisión de servicio de la vieja tecnología no se satisface, aparece una nueva oportunidad tecnológica, y emerge una nueva tecnología, con un modelo de forma de crecimiento similar a la descripta.

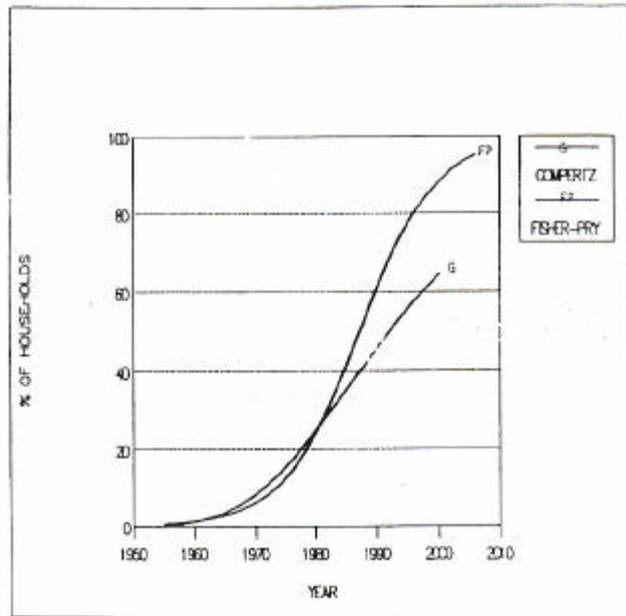


Figura 2.1: Modelos de crecimiento de Gompertz y Fisher-Pry aplicado a la suscripción de la televisión por cable en los Estados Unidos (extraído de la Ref. [23])

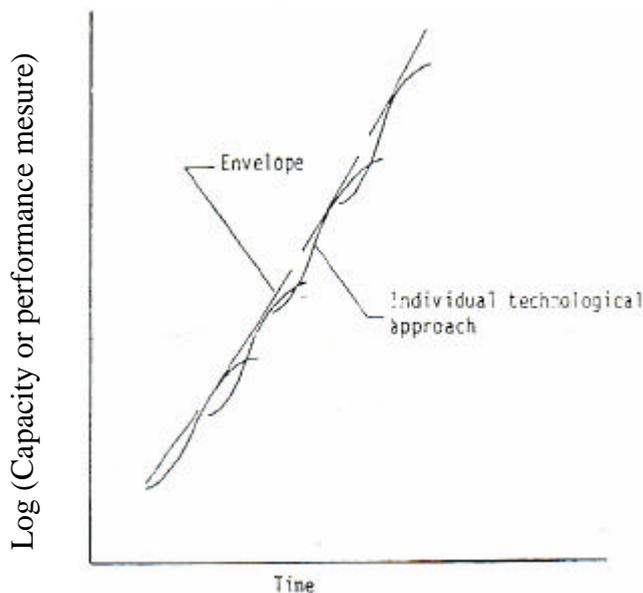


Figura 2.2: Capacidad de crecimiento de una tecnología (extraído de la Ref. [23])

La curva envolvente de las curvas **S**, de una familia de tecnologías que se muestra en la figura 2.2, representa un modelo de desarrollo. En general la progresión es algunas veces exponencial en un periodo considerable. En la figura 2.2, se ilustra la capacidad de las computadoras desde 1950 hasta 1990 y se observa un modelo lineal de la capacidad (en logaritmo) versus tiempo, la misma resulta equivalente a un desarrollo exponencial.

La dinámica de la economía, y el contexto político y social afectan fundamentalmente el desarrollo de la tecnología. Por lo tanto la prospectiva tecnológica requiere considerar antecedentes en economía, sociedad, política y en otras áreas pertinentes según la problemática a tratar. Ascher (1978)²³

sugiere que se deben considerar los siguientes factores para elaborar una prospectiva tecnológica:

1. Dependencia del progreso científico.
2. Límites físicos de la velocidad de desarrollo (¿cuán rápido crece?)
3. Madurez de la ciencia y aplicación de la tecnología.
4. Sensibilidad al ritmo de las innovaciones en los altos niveles de decisiones políticas.
5. Relevancia de los fondos de investigación y desarrollo.
6. Hasta que punto puede ser sustituido por otros productos o por innovaciones paralelas.
7. Relevancia de la difusión.
8. Oportunidad de apropiarse de avances de tecnologías relacionadas

2.3.3. Términos relacionados con la prospectiva

Con la idea de unificar los términos que se usan en la tesis, a continuación se presentan algunos relacionados con la prospectiva:

- **Proyección:** es la extensión en el futuro de una evolución pasada, usando ciertas suposiciones para la extrapolación o variación de tendencias. Una proyección constituye un pronóstico sólo cuando está basado en probabilidades.
- **Previsión.** Es una apreciación provista de cierto grado de confianza (probabilidad) de evolución de una magnitud en un horizonte dado.
- **Pronóstico tecnológico:** previsiones probabilísticas de desarrollos tecnológicos futuros.
- **Invariantes:** fenómeno que se supone permanente, hasta el horizonte estudiado (ejemplo la geografía para un análisis de cinco años).
- **Tendencia pesada:** designa un proceso de cambio acumulativo que se juzga lo suficientemente estable como para tomar el riesgo de extrapolarse a mediano y largo plazo. Se llama tendencia pesada o fuerte por sus enormes consecuencias si se modificasen sus causas o sus comportamientos generadores. La principal característica de la tendencia pesada es que contiene fuerzas muy poderosas que no pueden ser modificadas por una sola persona u organización. El ejemplo más evidente son las corrientes demográficas.
- **Tendencia emergente:** La principal característica de la tendencia emergente es que representa una corriente de cambio en proceso de formación o consolidación que todavía es susceptible de ser transformada. Es decir, aún se encuentra en proceso de definición pues existe una lucha de fuerzas económicas, sociales o tecnológicas, e intereses políticos que interactúan unas sobre otras con el ánimo de prevalecer. Las tendencias emergentes todavía no tienen un patrón definido del todo como en el caso de las tendencias pesadas, pues ésta

se encuentra aún en proceso de formación. Sin embargo, pueden ser cuantificadas y conceptualizadas a partir del reconocimiento de hechos y pautas de acción

- **Tendencias:** usualmente siguen el comportamiento tradicional de las curvas **S**, si bien la aceleración del mundo contemporáneo tiende a producir mutaciones en los procesos de maduración de los ciclos de vida de los procesos y los productos tecnológicos. Las curvas **S** suponen que una tecnología sigue un patrón que se despliega en varias etapas, como se mencionaron anteriormente.
- **Gérmenes:** factores de cambio, apenas perceptibles, pero que constituirán las tendencias dominantes de mañana.
- **Actores:** personas que juegan un rol importante en el sistema, por la dirección de las variables que caracterizan sus proyectos y sobre las cuales ejercen un control en mayor o menor grado.
- **Estrategia:** actividades y actitudes que se deben adoptar para conseguir un objetivo.
- **Conflicto:** confrontación de estrategias antagónicas.
- **Escenario:** es una descripción de un futuro posible y la trayectoria asociada a él, entre varios posibles futuros, como caminos que conducen a los mismos. Los escenarios sólo adquieren credibilidad y utilidad si son coherentes, verosímiles y pertinentes.
- **Alcance temporal prospectivo:** Cada sector tiene su propio horizonte temporal. Por ejemplo, el sector financiero suele enfocar su mirada hacia el próximo trimestre, y el largo plazo lo puede constituir un total de cinco años. Pero en sectores como energía, medio ambiente y educación, el horizonte es mucho más largo, alcanzando en el primer caso, normalmente 15 años. En línea general se establece:
 - Corto plazo: Un lapso de 5 años.
 - Mediano plazo: de 5 a 10 años.
 - Largo plazo: después de 10 años, siendo 25 años la “frontera de visibilidad” más allá de la cual se considera hoy en día que es muy difícil extraer conclusiones realmente confiables.
- **Variables claves:** factores cualitativos o cuantitativos que tienen una influencia relevante en el sistema. Para identificar las variables pueden realizarse entrevistas no dirigidas con los representantes de los actores que participan en el sistema estudiado. A título de ejemplo podemos mencionar las siguientes:
 - Variables de productos, mercados, tecnologías:
 - Diversificación del segmento estratégico.
 - Diversificación del producto.
 - Diversificación e internacionalización de mercados.

- Integración de nuevas tecnologías de empaquetado (packaging).
 - Integración de nuevos modos de conservación.
 - Integración de nuevos procesos.
 - Detección de nuevas materias primas.
 - Gestión del sistema de imagen.
 - Potencia comercial.
 - Volumen de ventas.
- Variables de producción:
 - Productividad industria.
 - Flexibilidad y estructura industrial.
 - Niveles de subcontratación.
 - Capacidad de producción y de almacenaje.
 - Calidad del producto.
- **Análisis prospectivo:** es un panorama de los posibles futuros o escenarios, que no son improbables a la luz de las causalidades pasadas y de la interacción entre las intenciones de las partes interesadas.

2.3.4. Metodologías

El fundamento metodológico para realizar análisis prospectivo se conforma de los rastros del pasado, de los datos de cómo se comporta el presente, así como de la consulta de las imágenes mentales o representaciones de los actores sociales acerca de aquello que puede advenir. Las metodologías existentes se enfocan en establecer un balance entre presente, pasado y futuro. En estricto sentido sólo conocemos el pasado. El futuro está siempre en proceso de hacerse. Pero se compone de materiales ya existentes que potencialmente se pueden conocer. Tenemos conocimiento del pasado y del presente. En función de ellos se pueden construir imágenes de futuro. Las imágenes de futuro deben ser plausibles, es decir, aceptables por el conjunto de usuarios posibles. Así, el futuro surge del movimiento permanente, de la interacción de continuidades (tendencias pasadas y emergentes, hechos portadores de futuro) y discontinuidades (factores de ruptura y crisis) en la historia. El futuro es producto del resultado de la interacción de tendencias, eventos y propósitos de los actores. Las tendencias están compuestas por procesos físicos, organizacionales, y sociales. Los eventos por definición son inciertos y no completamente controlables. Los propósitos u objetivos de los actores obedecen a juicios de valor, los cuales no siempre obedecen a un criterio fijo o a un determinado patrón de comportamiento.

Existen tres dimensiones principales para realizar análisis prospectivo, el extrapolativo basado en tendencias, el exploratorio de cambios sociales y el normativo basado en las imágenes de futuro y propósitos de los actores, que pueden ser complementarios. Usualmente estas tres dimensiones se simplifican en dos vías de reflexión o caminos de acercamiento al futuro: la vía extrapolativa y la exploratoria parte de una reflexión desde el pasado y presente hacia el futuro, es decir mediante una continuación histórica de tipo lineal que se orienta a identificar la probabilidad de ocurrencia de un efecto

futuro. Es por tanto descriptiva. El gran peso de los estudios de los años 60 y 70 era de este tipo (MIT, Límites de Crecimiento). En cambio, la reflexión normativa como la del modelo Bariloche²⁷ se orienta hacia perfilar los futuros deseables, busca identificar los objetivos de desarrollo de una sociedad. En la tabla 2.1 se sintetizan estas tipologías.

DIMENSIONES FUNDAMENTALES DEL ANÁLISIS PROSPECTIVO	
Tipo	Descripción
Extrapolativo	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Se pregunta: ¿A dónde llegaremos si seguimos como vamos? ▪ Extrapolación del pasado (futuro tendencial).
Exploratorio	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Se pregunta: ¿A dónde podremos llegar de acuerdo con las diferentes posibilidades y alternativas de evolución, dadas por la interacción de tendencias, eventos y actores? ▪ Orientada a la probabilidad, descriptiva.
Normativo	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Se pregunta: ¿A dónde llegaremos de acuerdo con las decisiones que tomamos, en función de los valores y preferencias? ▪ Orientada a los objetivos, prescriptivos.

Tabla 2.1: Dimensiones fundamentales del análisis prospectivo. Elaboración propia, adaptado de Medina Vásquez y Ortegón (2006)²⁴

En los variados procesos metodológicos existentes, se pueden reconocer en general los siguientes aspectos:

- Definición del sistema.
- Selección del horizonte temporal.
- Construcción del sistema y identificación de las variables clave.
- Recolección de información acerca de los estándares en el comportamiento de las variables en el sistema bajo estudio; la identificación de relaciones entre estas variables, y la definición de hipótesis.
- Instrumentos de simulación y análisis de alternativas.
- Planteamiento de decisiones estratégicas.

Medina Vásquez y Ortegón²⁴ recopilan de diversos autores las siguientes consideraciones sobre las bases metodológicas de la prospectiva:

“El futuro es en gran parte previsible, si se posee un sólido y amplio conocimiento del pasado; pero no totalmente previsible porque la elaboración del futuro depende de este factor misterioso e irreductible que es la libertad humana”.

“El futuro trazado por las tendencias puede en todo momento ser transformado por el contacto con ciertas discontinuidades. El futuro no está

determinado de antemano, es abierto. Lo esencial no es tanto adivinarlo como construirlo.”

“La disminución de la incertidumbre al nivel de la sociedad no será nunca completa. Se hace por etapas sucesivas. No puede ser sino aproximativa y limitada en el tiempo y en el espacio”.

“El planificador trata con la incertidumbre. Para comprenderla trata de alcanzar el conocimiento más objetivo posible y de equivocarse lo menos subjetivamente posible. Requiere combinar métodos de conocimiento objetivo de la realidad y de disminución de los sesgos subjetivos de percepción y análisis”.

“La anticipación es la capacidad de un individuo o un grupo para pensar hacia delante. Pasa por una adecuada comprensión del marco cultural, intelectual, afectivo y simbólico en el cual se desarrolla. Depende de la herencia familiar, social y cultural, la experiencia y la formación personal, el contexto y el medio ambiente del momento, los objetivos, propósitos y expectativas del momento”.

“La anticipación se basa en la comprensión y manejo de las imágenes de futuro. La construcción de futuros conlleva entender el proceso de elaboración de la imagen, visión y proyecto de futuro”.

“Es relevante comprender la diferencia entre imágenes y visiones de futuro. Una imagen de futuro es un cuadro mental de un objeto o un evento, una representación acerca de un estado particular de las cosas proyectado en el futuro. Las imágenes se refieren a los supuestos básicos sobre el ser humano, la naturaleza, la interacción social y nuestro lugar en el universo. Subyacen en nuestros valores y actitudes. Gobiernan nuestras relaciones con los otros (Amara, 1983). Una visión es una imagen de futuro transformadora, realizable, cargada de significado para una colectividad. Es una semilla de cambio escondida en el presente. Las visiones son construcciones sociales, fluyen en el tiempo, son múltiples e interactuantes”.

“Una visión de futuro tiene importantes implicaciones desde el punto de vista político, educativo y cultural. Una visión de futuro es una imagen movilizadora que pone en escena tres sentidos de la acción colectiva. El sentido–dirección: a donde debe llegar una comunidad en el futuro. El sentido–utilidad: para qué deben esforzarse los miembros de la comunidad. El sentido–finalidad: o por qué deben hacerlo”.

“Es relevante distinguir entre la colonización del futuro y la construcción de futuros. La colonización del futuro es la tradición dominante en la prospectiva entendida como observación de los cambios sociales. Busca calcular el riesgo, para llegar primero y con ventaja hacia el futuro. El estudio del futuro es visto como un medio de acumulación económica y control político. En cambio, la construcción social del futuro busca crear visiones y proyectos de convivencia–cooperación humana. Necesita pensamiento estratégico (visiones, valores, capacidades) y una formación ética profunda”.

Además los autores indican que hay diferentes posiciones cuando se visualiza el futuro, pero todas comparten varias ideas centrales o principios fundamentales, de los cuales se destacan los siguientes:

- El futuro es un campo de opciones abiertas.
- El futuro es un campo de tensiones permanentes.
- El futuro es un espacio de conocimiento.
- Frente al futuro debe tenerse una actitud modesta, de constante aprendizaje.
- La prospectiva concibe la realidad como una fuente inagotable de cambios, pero no todos pueden ser anticipados.
- La prospectiva implica una concepción sistémica y multidisciplinaria para abordar la realidad desde diferentes puntos.
- No hay una metodología mejor que otra sino múltiples herramientas para usos contingentes.
- La selección de una u otra herramienta estará definida por la naturaleza específica del tema a tratar, por el nivel de complejidad e indeterminación que se aborde, por el grado de participación que se desea, los recursos en términos de tiempo, dinero y experiencia con los que se cuenta, los alcances y resultados esperados, el horizonte de trabajo que se busca, la disponibilidad de información y otros criterios en juego.

Existen numerosas categorizaciones de los métodos utilizados para la prospectiva tecnológica, una posible se muestra en la tabla 2.2 donde se destacan las características y algunos de los principales métodos.

2.3.4.1. Método de los escenarios

Los escenarios son quizás el método más popular para los estudios del futuro. Surgieron primero en el área militar y luego fueron adaptados para ambientes empresariales, políticos, para la determinación del transporte aéreo, el sistema hidráulico de Francia, la industria del aluminio y otros. Este método se lo utiliza para responder a la pregunta: ¿Cómo ocurre, paso a paso, una situación hipotética en el futuro? se puede utilizar tanto en análisis prospectivos cuyos fundamentos sean extrapolativos, exploratorios o normativos.

Trabajar con escenarios permite crear imágenes holísticas, estructuradas e integradas de cómo puede desarrollarse el futuro. Esas imágenes a su turno llegan a ser el contexto de planificación, un terreno de pruebas para las ideas o el estímulo para nuevos desarrollos.

El método de los escenarios aplicados a la prospectiva permite construir una base para la reflexión y evaluación de posibles estrategias. Esta metodología puede ser combinada con otras, tales como métodos directos, el método Delphi²⁸ que es uno de los más utilizados en el mundo, por ejemplo en España se lo emplea de manera extensa consultando aproximadamente a 1500 expertos.

Métodos de Prospectiva Tecnológica		
Tipo	Algunos métodos	Características
<u>Directos:</u> realizan prospectivas directas de parámetros que evalúan aspectos tecnológicos.	-Opinión de expertos -Delphi -Extrapolación de tendencias	Estos métodos no explicitan consideraciones relacionadas con aspectos económicos, sociales o políticos. La naturaleza de estos cambios se considera en forma subjetiva.
<u>Correlativos:</u> Evalúan parámetros correlativos de la tecnología con parámetros de otras tecnologías o la historia de parámetros tecnológicos	-Escenarios -Analogías	Implícitamente consideran que las relaciones de cambio no se modifican, se suponen estructuras estáticas.
<u>Estructurales:</u> Explicitan consideraciones de causa-efecto y las relaciones por las cuales algún efecto crece	-Modelo causal -Modelos de simulación -Árbol de relevancia	Realizan consideraciones formales entre la tecnología y el contexto. En la simulación con modelos, la estructura del modelo debe ser válida durante el horizonte temporal definido para la prospectiva.

Tabla 2.2: Principales métodos de la prospectiva tecnológica.

Las características distintivas de los escenarios destacadas por Medina Vásquez²⁴ son:

- Se trata de enunciados hipotéticos. En modo alguno pretenden “predecir” el futuro, sino señalar un abanico de opciones y situaciones probables.
- Las hipótesis no son caprichosas, están fundadas en diagnósticos razonablemente consistentes de las fuerzas de cambio que modelan el sistema bajo estudio.
- Es muy poco probable que un escenario “tenga lugar” exactamente de la forma como se visualiza. Básicamente sugiere diversas secuencias de acción con el objeto de sensibilizar a los tomadores de decisiones sobre lo que puede acontecer y preparar posibles respuestas en forma anticipada.
- Los escenarios producen visiones de la realidad agregadas, comprensivas, y holísticas. Deben sustentarse necesariamente en indagaciones multidisciplinarias.
- Más que interesarse por determinar la fecha probable de un acontecimiento, buscan analizar interrelaciones entre eventos y sugerir sus posibles consecuencias.

- Los escenarios tienen como propósito señalar los relieves significativos del objeto de análisis, identificar actores y factores determinantes, seleccionar dentro de un amplio conjunto de datos aquellos que poseen pertinencia e impacto en una situación concreta.
- Los escenarios pueden fundamentarse en análisis detallados; constituyen un modo de comunicación que usa un modo argumentativo esquemático, conciso, conjetural. Por eso se busca identificar coordenadas básicas alrededor de las cuales se puedan trazar secuencias probables de comportamientos.

2.3.4.1.1. Método de los escenarios con un enfoque exploratorio

Uno de los principales investigadores en esta área es Michel Godet²⁸, cuyo aporte es haber ensamblado diferentes técnicas, frecuentemente formalizadas (matrices de impacto cruzado, análisis estructural, etc.) con el análisis de las estrategias de los actores. Este autor categoriza los escenarios en:

- **Escenarios posibles:** son todos los escenarios que se pueden imaginar.
- **Escenarios realizables:** los escenarios posibles de materializarse considerando las restricciones existentes.
- **Escenarios deseables:** Se considera un futuro posible y anhelado.

Según su probabilidad se clasifican en:

- **Escenario tendencia:** es el escenario formado al extrapolar las tendencias, pero puede ser probable o no.
- **Escenario referencial:** es el escenario más probable, puede ser tendencial o no.
- **Escenario contrastado:** es la extrapolación de un tema voluntariamente extremo, la determinación a priori de una situación futura. Es un camino muy poco probable. Se fija un escenario de situación futura, en general muy contrastado en relación con el presente y se interroga regresivamente sobre las trayectorias posibles.

Para la construcción de los escenarios, Godet²⁸ identifica dos fases:

a) Construcción de una base: corresponde a una *imagen* del estado actual del sistema constituido por el fenómeno estudiado y su entorno. La imagen debe ser:

- Detallada en el plano cuantitativo y cualitativo.
- Global (incluyendo perspectiva económica, tecnológica, política, sociológica y ecológica).
- Dinámica, poniendo en evidencia las tendencias pasadas y los hechos portadores de futuro.
- Explicativas de los mecanismos de evolución.

Esencialmente la elaboración de la *Base* comprende cuatro etapas:

- Delimitación del sistema constituido por el fenómeno estudiado y su entorno general (político, económico, tecnológico, etc.)
- Determinación de las variables que caracterizan el sistema.
- Determinación de las variables claves.
- Retrospectiva y estrategia de los actores.

b) Elaboración de “futuros” para el análisis. Teniendo en cuenta, las variables claves, las tendencias, las estrategias de los actores y los gérmenes de cambio, se hacen jugar los mecanismos de evolución y confrontación de proyectos, considerando que a cada juego de hipótesis le corresponde un escenario.

Dada la incertidumbre que pesa sobre la hipótesis, este método se apoya en la consulta de expertos, a través de cuestionarios o entrevistas, para luego calcular y jerarquizar las probabilidades atribuidas por cada experto a los posibles escenarios.

Para Godet²⁸, esta estructura lógica se impone en una gran cantidad de estudios prospectivos. Sin embargo el autor también señala que no es imprescindible recorrer el camino descrito de principio a fin. Todo depende del grado de conocimiento del sistema estudiado y de los objetivos que se persigan. El método de escenarios es modular porque se puede, en función de las necesidades, limitar el estudio a uno u otro módulo.

Las empresas manejan los estudios de prospectiva de dos formas diferentes: en forma confidencial para uso exclusivo de las decisiones estratégicas de los directivos, o como instrumento de reflexión colectiva y de movilización de la inteligencia frente al cambio. El grupo Lafarge por ejemplo dedicado al negocio del cemento, agregados y hormigones, utilizó la prospectiva como instrumento de estrategia. Este grupo anticipó que desde mediados de los 70, el declive del cemento sería del -1% hasta fin del siglo y decidió invertir en sectores de alto potencial como la biotecnología, cuyo único punto en común con el cemento es utilizar poca mano de obra.

2.3.4.1.2. Método de los escenarios con un enfoque normativo

La característica distintiva de este enfoque se debe a que parte del futuro, analiza el presente y contrasta la brecha entre el futuro deseable y la situación actual, para regresar del futuro tratando de diseñar estrategias que permitan cerrar la brecha detectada. La metodología propuesta por Wladimir Sachs y modificada por Miklos y Tello²⁴ se compone de etapas en constante interacción, que se sintetizan a continuación:

- *Fase normativa*: explicita el futuro deseable y del futuro lógico. El futuro deseable representa un polo de pensamiento que refleja expectativas y aspiraciones. Permite visualizar un futuro deseado, sin restricciones ni condicionamientos de factibilidad tecnológica. Por otra parte, la *fase normativa* hace explícito el futuro lógico, el cual proviene de extrapolar la realidad hacia el futuro y hacer una crítica del presente actuando como medio de contraste.

- *Fase definicional: consiste* en la percepción de la realidad presente. Incluye tres elementos: el foco u objeto focal, el entorno y los instrumentos y factores que puede controlar el tomador de decisiones. Aquí se pueden explicitar las causas y razones por las que la realidad presente no alcanza niveles satisfactorios y brinda orientación para juzgar qué es relevante y qué no lo es.
- *Fase de confrontación: se* produce una evaluación que permite identificar los futuros factibles y las dificultades y potencialidades para alcanzar la imagen diseñada.
- *Fase de determinación estratégica y factibilidad: busca* mantener la congruencia entre la conceptualización y el desarrollo prospectivo. Las estrategias a ser planteadas no deben ser concebidas como un programa cerrado o determinante. Por el contrario, deben presentar un carácter generador, creativo y participativo. El nivel de factibilidad se logra con una trayectoria de acción practicable que vuelve probable el futuro deseable. En este sentido, es esencial el análisis del conjunto de instrumentos disponibles y potenciales que pueden transformar la realidad. En esta fase se identifican sólo aquellas opciones mayores que permitan un mayor movimiento y creatividad.

Según Medina Vazquez y Ortegón²⁴, el enfoque normativo puede ser útil para situaciones que requieran de alta creatividad e innovación, para generar nuevas ideas y comportamientos, nuevos proyectos y rupturas de los modelos establecidos. Por ejemplo, se emplea en el diseño de nuevos productos o procesos.

2.4. Dinámica de sistemas

2.4.1. Concepto de sistema

En el contexto de esta tesis *“un sistema es un objeto formado por un conjunto de partes entre las que se establece alguna forma de relación que las articula en la unidad que es precisamente el sistema”*²⁹. El sistema está formado por un conjunto de elementos relacionados entre sí. La estructura del sistema es decir la red de relaciones entre estos elementos, es esencial para comprender su evolución, puesto que esa estructura conserva cierta permanencia.

Aracil y Gordillo²⁹ proponen una descripción elemental de sistema *“El conjunto C de sus partes y las relaciones R que establecen las vinculaciones que se producen entre ellas. Es decir un sistema es el objeto que admite al menos una descripción mínima según la cual está formada por un conjunto C y una relación R entre los elementos del conjunto C”*.

2.4.2. Antecedentes

La Teoría General de Sistemas (TGS)³⁰ fue desarrollada originalmente por L. Von Bertalanffy en los años 30, quien observando la evolución de la ciencia moderna notó problemas y concepciones similares en campos muy disímiles y como la ciencia de la época se encontraba especializada era muy difícil trabajar en forma conjunta. Frente a esta problemática funda una nueva disciplina llamada teoría general de los sistemas, cuyo *“tema es la formulación y derivación de aquellos principios que son válidos para los sistemas en general”*³⁰. En la década del 60, el Profesor. Forrester del MIT³¹, retomó las ideas de la teoría general de sistemas y desarrolló la dinámica de sistemas, disciplina que consiste esencialmente en una metodología para estudiar sistemas complejos en los cuales aparecen estructuras de retroalimentación. La estructura de retroalimentación se refiere a la situación en que X afecta a Y é Y alternadamente afecta a X, por ejemplo mediante una cadena de causas y de efectos. Por lo tanto no es posible estudiar el sistema analizando solamente la relación entre X e Y independientemente de la relación entre Y e X.

Un sistema dinámico se caracteriza por las relaciones de influencia entre los elementos del sistema que pueden tener una descripción verbal. El método de la dinámica de sistemas permite realizar transacciones, en las que partiendo de una descripción en lenguaje ordinario del sistema se trata de modelar los aspectos estructurales incorporando aspectos cuantitativos que explicitan esa descripción. De hecho la Dinámica de sistemas se encuentra en una encrucijada entre lo cuantitativo y lo cualitativo. El método de Forrester está vinculado con la teoría de sistemas, en la medida que suministra un procedimiento para estudiar sistemas con estructuras complejas, donde el bucle de realimentación es el bloque básico.

La metodología básica utilizada en dinámica de sistemas consiste esencialmente en:

- Identificar un problema.
- Desarrollar una hipótesis dinámica del problema.
- Construir un modelo de simulación del sistema.
- Probar el modelo.
- Poner la solución en ejecución.

Esta secuenciación no implica un trayecto lineal entre los pasos, ya que generalmente es necesario regresar a pasos anteriores.

Para el análisis de los sistemas se requiere de un pensamiento sistémico, que incluye un marco conceptual, un cuerpo de conocimientos y herramientas, que se han desarrollado en los últimos cincuenta años con el objeto de que ciertos patrones resulten claros y faciliten la posibilidad de cambio a través de transformaciones intencional. Para esto resulta importante la comprensión de los sistemas y subsistemas involucrados, la relación entre los mismos, una visión “bifocal”, es decir observar la globalidad y trabajar lo puntual, comprender las causas del sistema y el concepto de “feedback” o

realimentación que muestra cómo los actos pueden reforzarse o contrarrestarse (vale decir equilibrarse entre sí).

2.4.3. Elementos básicos del lenguaje sistémico

El lenguaje sistémico básico está compuesto por:

- **Atributos:** Son elementos del sistema que representan aspectos perceptible del sistema.
- **Relaciones de influencia entre atributos:** Son los vínculos entre los elementos de un sistema; indican cómo variaciones de determinado atributo afectan a las manifestaciones de otro.
- **Diagrama de influencias:** son bosquejos esquemáticos de los elementos que constituyen el sistema y las relaciones entre sí. Permiten tener una perspectiva global de cómo se articulan las partes en la unidad del sistema. Como se puede observar en la figura 2.3.
- **Estructuras de Realimentación simple:** En la dinámica de sistemas, las estructuras más simples de realimentación pueden ser negativas o positivas. Estas se desarrollan a continuación:

a. Bucle de realimentación negativa

Si suponemos un incremento del elemento A como se muestra en la figura que produce un decremento del elemento C, que a su vez genera un decremento de B. El decremento en B producirá un decremento de A. Es decir, mediante la cadena causal circular, el incremento inicial de A se ha contrarrestado.

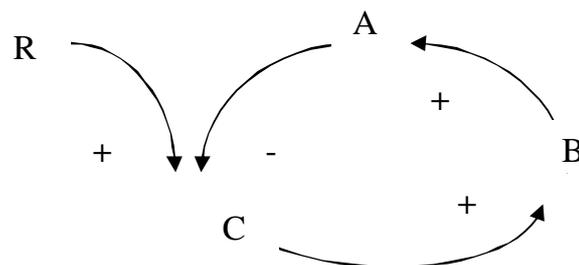


Figura 2.3: Estructura de realimentación negativa.

En la realimentación negativa por una parte se tiene una información que circula por el sistema y por otra se tiene una influencia negativa, es decir, si crece una parte decrece la otra. Siempre que hay una estructura de realimentación negativa se tiene un comportamiento autorregulador.

Para ilustrar este tipo de estructura en el contexto de esta tesis consideremos que, a medida que se utiliza AR en la elaboración de

hormigones, más nos acercamos al valor deseado de utilización, entonces habrá menos discrepancia entre la cantidad de AR que se utilizó y el óptimo a utilizar. Esto se puede representar en dinámica de sistemas como un bucle de realimentación negativa, como el que se ilustra en la figura 2.3, en donde:

A = Volumen de agregado reciclado.

C = Discrepancia (Volumen de agregado reciclado utilizado menos el volumen de agregado reciclado disponible).

B = Demanda de AR.

Formulación de un bucle con realimentación negativa

- El estado del sistema, x = Cantidad de AR utilizado.
- La acción o flujo, F = Consideramos la utilización de AR.
- La discrepancia $D = (x_d - x)$, Volumen de agregado reciclado utilizado menos el volumen de agregado reciclado disponible.
- K = La tasa de crecimiento de x .
- El objetivo, meta o estado deseado x_d representa la cantidad de agregado reciclado a utilizar como meta.

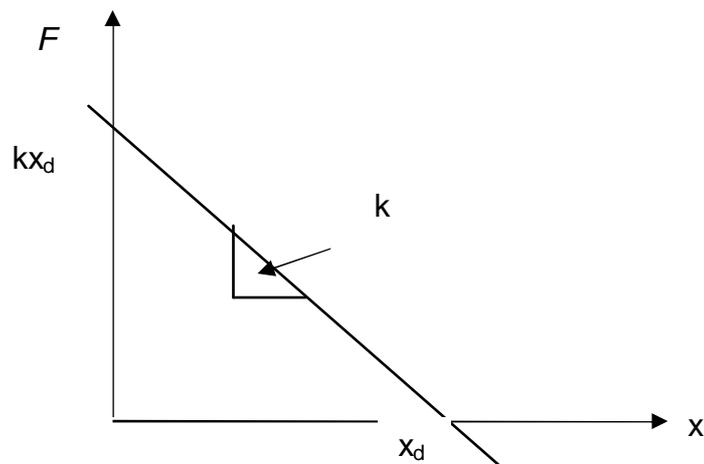


Figura 2.4: Relación entre el flujo F y el estado x en realimentación negativa.

Se supone que el estado representa la acumulación de acciones pasadas, entonces el flujo se obtiene derivando el estado en el tiempo:

$$\frac{\partial x}{\partial t} = F \quad (2.1)$$

Si el estado representa la acumulación de acciones pasadas, la relación inversa puede obtenerse mediante la integral de flujo:

Capítulo 2

$$x = \int_0^t F dt \quad (2.2)$$

Los otros elementos del bucle se representan por las ecuaciones:

$$\begin{aligned} F &= kD \\ D &= x_d - x \\ F &= k(x_d - x) \end{aligned} \quad (2.3)$$

Remplazando las expresiones (2.3) en (2.2) y resolviendo la integral de (2.2), se llega a:

$$x = \int_0^t k(x_d - x) dt = x_d + [x(0) - x_d] e^{-kt} \quad (2.4)$$

Cuando el estado X tiende al objetivo X_d , se produce una función monótona decreciente. El comportamiento al que se está aludiendo es el que cualitativamente aparece en la figura 2.5.

Este comportamiento se presenta exclusivamente en los sistemas en que el bucle depende de una única variable de estado, o sea en ecuaciones diferenciales de primer orden. Para sistemas de orden superior pueden surgir oscilaciones.

En el contexto del ejemplo dado, la interpretación de la figura 2.5 es que la cantidad de AR a utilizar tiene como límite la cantidad de AR disponible.

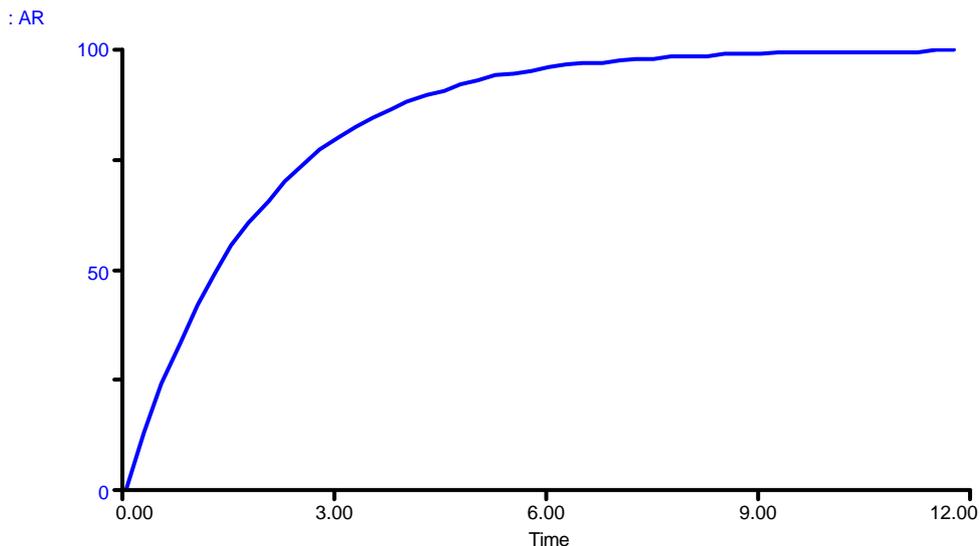


Figura 2.5: Evolución del consumo de AR (Realimentación negativa).

b. Bucle de realimentación positiva

Consideramos a continuación la retroalimentación positiva, suponemos un incremento del elemento A, este de acuerdo al signo de la influencia determinará un incremento del elemento C, que a su vez producirá un incremento de B. El comportamiento que resulta consiste en acelerar el proceso de cambio tanto sea de crecimiento o de declive.

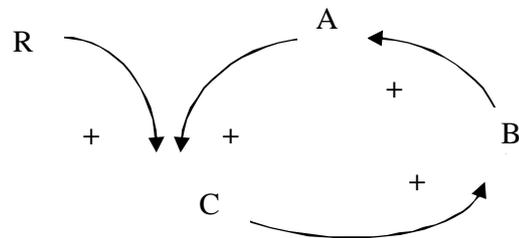


Figura 2.6: Estructura de realimentación positiva.

Un ejemplo simplificado de ciclo de realimentación positiva se podría presentar cuando los HAR satisfacen las necesidades técnicas y económicas de los usuarios y a medida que crece la satisfacción de los usuarios crece la difusión, lo que genera un incremento de las ventas.

Esto modela la relevancia de las satisfacciones técnicas y económicas en la difusión de los HAR. El significado de las variables en este caso puede ser:

C = Satisfacción técnica, económica o de desempeño técnica de los clientes.

B = Difusión del producto.

A= Volumen de venta de HAR.

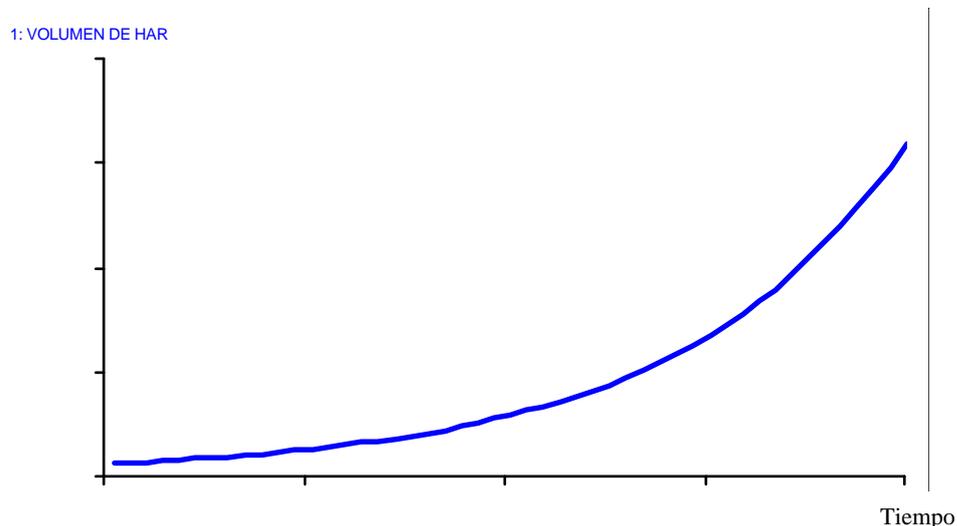


Figura 2.7: Evolución en el tiempo de la venta de HAR (Realimentación positiva).

El comportamiento representado en la figura 2.7, recibe la denominación de crecimiento exponencial. Este tipo de crecimiento acelerado no se produce en la naturaleza o en los sistemas sociales, hasta sus últimas consecuencias, porque todo proceso de crecimiento tiene su límite. Para introducirlo en un lenguaje sistémico, los sistemas complejos también incluyen bucles de realimentación negativa.

Capítulo 2

▪ Formulación de un bucle elemental con realimentación positiva

Supongamos un sistema en el que:

- El estado del sistema x = Volumen de HAR vendido.
- La acción o flujo F = venta de HAR.
- K = tasa de crecimiento de X producto de la difusión

Se supone que el flujo representa la derivada del estado según la ecuación (2.1), mientras que el estado representa la acumulación de acciones pasadas de acuerdo con la ecuación (2.2) Los otros elementos del bucle se representan por la ecuación:

$$F = kx \quad (2.5)$$

Resolviendo la integral

$$x = \int_0^t kx dt = x[0]e^{kt} \quad (2.6)$$

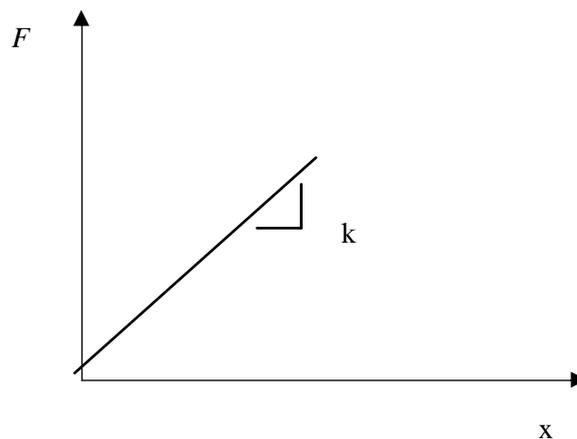


Figura 2.8: Relación entre el flujo F y el estado x , realimentación positiva

c. Retraso

En todo sistema se produce un retardo entre las acciones y sus consecuencias, como se ilustra en la figura 2.9. Cuando los retardos son importantes, pueden producir inestabilidad en el sistema. Hay que tener en cuenta que la relación de influencia que liga a dos variables puede implicar una transmisión para la que se requiere el transcurso de un cierto tiempo. Por ejemplo si se decide aumentar las ventas de los HAR mediante una disminución de los precios, el efecto de esta medida se verá luego de un tiempo, como se observa en la figura 2.10.

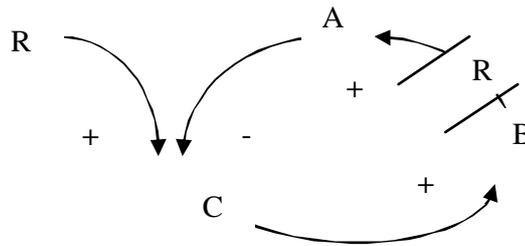


Figura 2.9: Estructura de realimentación negativa con retraso.

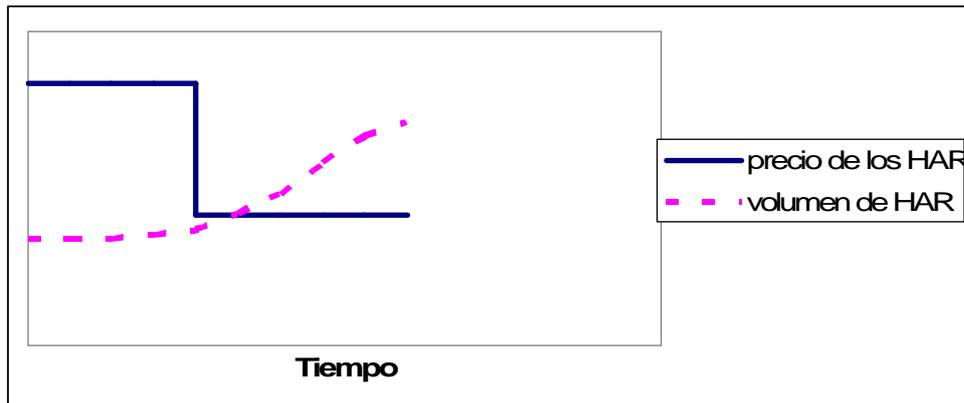


Figura 2.10: Evolución de las ventas y del precio de los HAR.

La forma más sencilla de obtener una aproximación a un retraso en dinámica de sistemas es mediante un retraso de primer orden, con una ecuación diferencial de la forma:

$$\dot{x} = a(u - x) \quad (2.7)$$

Donde:

$$a = 1/T_a \quad (2.8)$$

$$T_a = \text{Constante de tiempo del sistema.} \quad (2.9)$$

Esto permite interpretar que la señal de salida x trata de ajustarse a la señal de entrada u , con una constante de tiempo T_a .

El retraso de primer orden consiste, en un flujo de entrada F_e que se acumula en una variable de estado X y que fluye retrasado a la salida mediante un flujo F_s . Como se muestra en la ecuación (2.10)

$$\frac{dx}{dt} = F_e - F_s = F_e - \frac{x}{T_a} \quad (2.10)$$

Para obtener una mejor aproximación a un retraso se emplean varios sistemas de primer orden en serie. En relación a los retrasos en los diagramas de influencia deben tenerse en cuenta los siguientes efectos:

- Para $t \rightarrow \infty, x = u$ Es decir a largo plazo la entrada se hace igual a la salida con independencia de los retrasos que se produzcan.
- Por el contrario, durante el transitorio, el efecto de un retraso puede ser inestabilizador.

2.4.4. Estructuras complejas de realimentación

Los sistemas frecuentemente presentan múltiples bucles de realimentación entrelazados, de modo que los bucles aparecen en combinación. De éstos hay algunos particularmente interesantes que se denominan arquetipos sistémicos. Peter Senge³² señala que uno de los conceptos más importantes en el campo del pensamiento sistémico es la idea de que ciertos patrones estructurales son recurrentes, y la identificación de estos “arquetipos sistémicos” o “estructuras genéricas” permiten hallar el punto donde los actos bien localizados en las estructuras, pueden conducir a mejoras significativas y duraderas (punto de apalancamiento). Todos los arquetipos sistémicos están constituidos por los ladrillos sistémicos: es decir procesos de realimentación positiva, negativa y retrasos. Los pensadores sistémicos han definido 16 arquetipos, de los cuales ocho son los más frecuentes, de los cuales en este trabajo analizaremos dos: el de crecimiento sigmoïdal y el de crecimiento con inversión insuficiente.

Uno de los propósitos de los arquetipos sistémicos es identificar en esas estructuras el punto de apalancamiento. Para Mejia³³ los arquetipos no sólo se definen por la estructura causal básica (diagramas, flujos, formulaciones matemáticas, etc.), ya que no todos los aspectos o intuiciones de la situación problemática se reflejan directamente de la estructura causal básica. La definición de un arquetipo involucra elementos estructurales y funcionales, y en algunos casos posiblemente comportamentales. La estructura causal de una situación explica cómo se producen tanto los elementos funcionales como los comportamentales en una situación particular, y al hacerlo permite identificar posibles puntos de apalancamiento.

En este trabajo no se pretende dar una definición precisa de los arquetipos, sino considerar los arquetipos como un conjunto de rasgos (no delimitados en forma precisa) que facilitan la comprensión de una situación. Por tal razón el objetivo no es clasificar las situaciones dentro de alguno de los arquetipos sistémicos, sino identificar aspectos de las situaciones que permitan analizarlos a partir de alguno de los arquetipos.

a. Arquetipo del crecimiento sigmoïdal

En este arquetipo se observan dos bucles, uno de realimentación positiva y otro de realimentación negativa, como lo que se muestra en la figura 2.11. Para ilustrar este arquetipo se considera el crecimiento del volumen de ventas de los hormigones con agregados reciclados por la satisfacción de los clientes y dado que se incrementan las ventas de HAR disminuye la cantidad de AR disponible. Denominaremos:

C = Satisfacción técnica y económica de los clientes.

A= Volumen de venta de HAR.

B= Recursos agregados reciclados (AR)

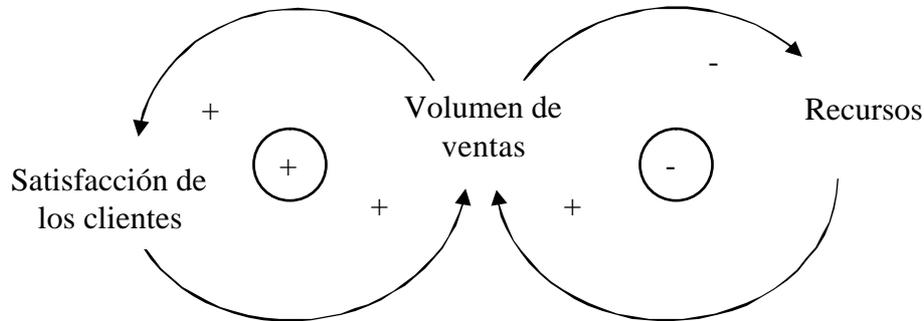


Figura 2.11 Arquetipo de crecimiento sigmoidal

En la fase inicial del proceso, cuando se desencadena el crecimiento, la limitación de los recursos no es perceptible, por lo que el bucle de realimentación positiva es el dominante y se puede producir un crecimiento casi exponencial de las ventas. Al crecer éstas, la limitación de los recursos comienza a manifestarse, de modo que la dominación de los bucles va pasando del positivo al negativo. En la medida en que se agoten las posibilidades de crecimiento, el bucle de realimentación negativa resulta dominante hasta que, al final del proceso, se corta la posibilidad de incremento de las ventas. El resultado típico se muestra en la figura 2.12.

El crecimiento sigmoidal es característico de difusión de una innovación tecnológica o de la introducción de un nuevo producto en el mercado. El bucle negativo también se puede producir por saturación del mercado.

Formulación matemática de un crecimiento sigmoidal

Las ecuaciones que definen un crecimiento sigmoidal son:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dy} &= F_1 + F_2 \\ F_1 &= k_1 + x \\ F_2 &= k_2 + (x_d - x) \end{aligned} \tag{2.11}$$

$$\frac{dx}{dy} = (k_1 - k_2)x + k_2x_d$$

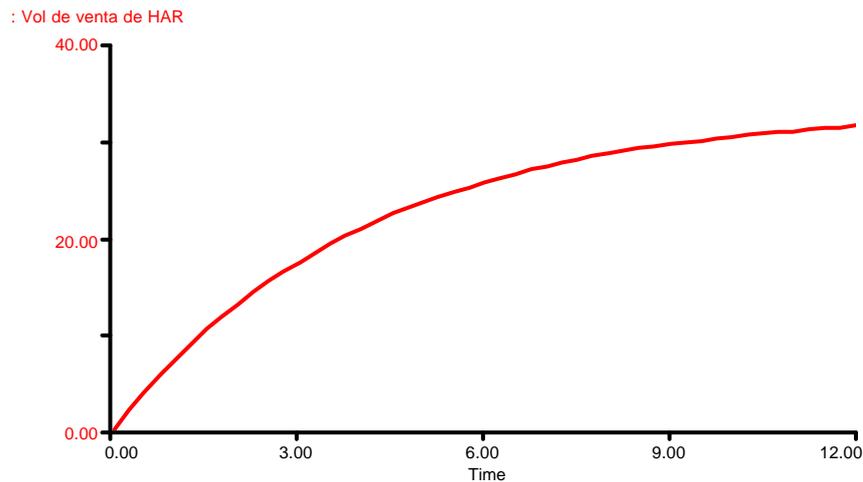


Figura 2.12: Crecimiento sigmoideal

De acuerdo a los valores relativos de k_1 y k_2 pueden darse las situaciones que se ilustran en la figura 2.13.

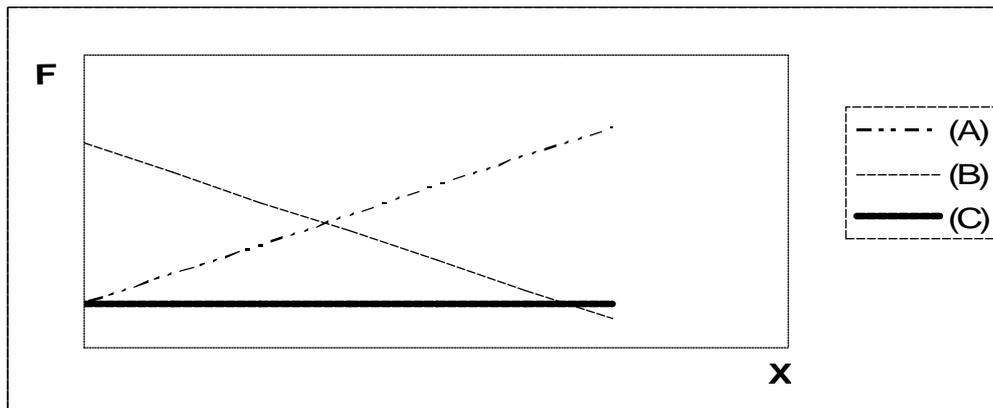


Figura 2.13: Relación entre X y F para: (A) $k_2 < k_1$, (B) $k_2 = k_1$ y (C) $k_2 > k_1$.

Un caso en que el crecimiento sigmoideal se produce es aquel en el cual las relaciones entre los flujos F_1 y F_2 , aunque monótonas crecientes, se cortan entre sí. Esto se interpreta observando la figura 2.14. en donde para valores pequeños de x , el bucle de realimentación positiva domina sobre el negativo, mientras que para valores superiores sucede lo contrario.

Otro ejemplo de crecimiento sigmoideal en el contexto de esta tesis se presenta en la figura 2.15, cuando un sistema de gestión de la calidad para los HAR genera satisfacción directa de los clientes de HAR, puede generar amenaza en la relación de los proveedores de agregados naturales con la empresa elaboradora de hormigón. Una posibilidad de “aplicación de palanca” para modificar la conducta del sistema es identificar y modificar el factor limitativo, que en este caso son los productores de agregados natural que se los puede involucrar en la producción de agregados reciclados mediante beneficios económicos.

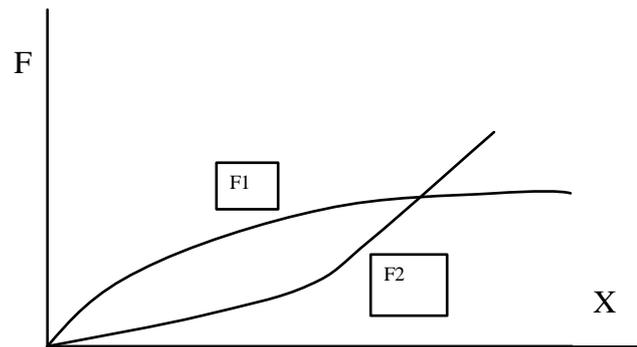


Figura 2.14: Formas no lineales que pueden generarse entre F y X .

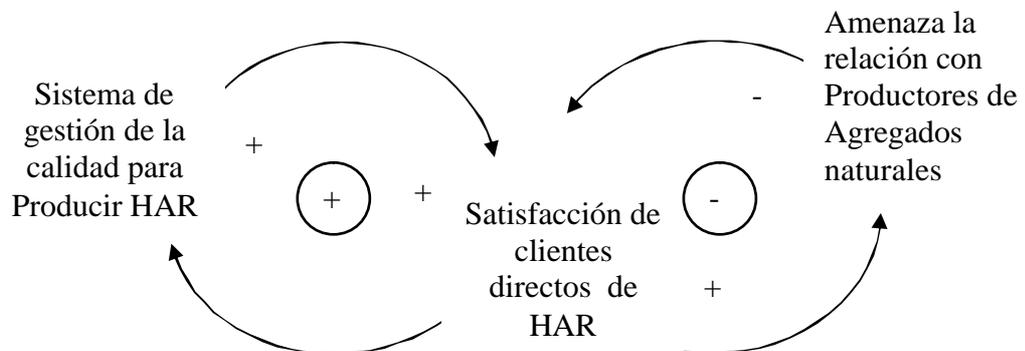


Figura 2.15: Crecimiento sigmoideal

b. Arquetipo del crecimiento con inversión insuficiente

Un ejemplo de este arquetipo se ilustra en la figura 2.16 y se puede presentar cuando el incremento de las ventas genera una disminución en los tiempos de entrega debido a que la capacidad productiva no es la adecuada, lo que puede ocasionar una decepción en los clientes. La solución no es reforzar las ventas (que es lo primero que se percibe), si no que es necesario aumentar la producción. Lo peor que se puede hacer en estos casos es presionar el proceso reforzador de las ventas, ya que los clientes perciben una disminución en la calidad de los servicios. En este arquetipo se observa una causa y un efecto separados en el tiempo.

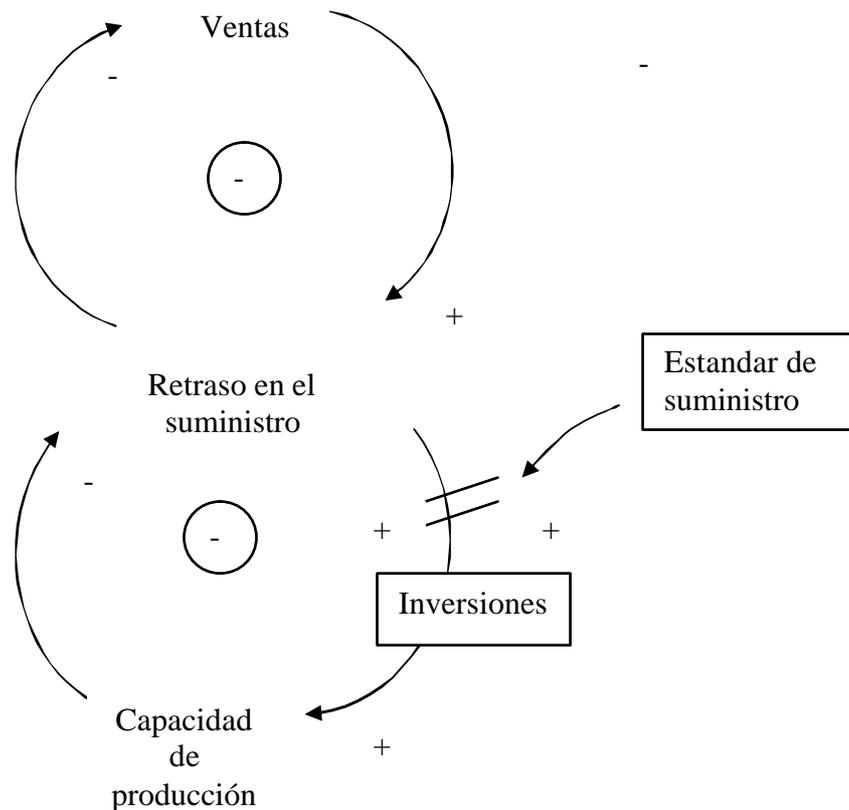


Figura 2.16: Arquetipo del crecimiento con inversión insuficiente

2.4.5. Diagramas de Forrester

Los diagramas Forrester²⁹, permiten estudiar sistemas con estructuras más complejas. Para la representación, las variables se clasifican en tres grupos:

- Variables de estado: Son las más importantes y representan las magnitudes cuya evolución es específicamente significativa.
- Variables de flujo: Se encuentran asociada a cada variable de estado y determinan una variación respecto del tiempo de las variables de estado.
- Variables auxiliares, constituyen las restantes variables que aparecen en el diagrama.

La distinción entre variables de estado y variables auxiliares, a partir del diagrama de influencias, no siempre está clara. Una regla aceptable para diferenciarlas se basa en considerar cómo se comporta la variable ante un cambio de sistema. Las variables de estado varían lentamente acumulando los flujos. Las variables auxiliares varían instantáneamente en respuesta a los valores que toman las variables de estado a lo largo del sistema. También se puede considerar que si se detiene el proceso que se pretende modelar, los flujos se anulan mientras que las variables conservan su valor.

Para la elaboración de los diagramas de Forrester en esta tesis se utilizará la herramienta informática del programa Stella³⁴. La elección de este Software se debe a que se desarrolló en el MIT bajo la supervisión del Dr. Forrester precursor de la dinámica de sistema. Esta herramienta ofrece una forma práctica de visualizar y comunicar la complejidad de los sistemas, permite representar procesos y comprobar esas representaciones a través de simulaciones.

En el programa Stella para la representación de las variables y de los otros elementos del sistema, se adoptan la siguientes simbología:

a. Stock

En español se conocen como “acumuladores”. Son las variables de estado o de nivel cuya evolución es significativa para el estudio del sistema. Los estados representan magnitudes que acumulan los resultados de acciones tomadas en el pasado. Esta función de acumulación puede asimilarse a la del nivel alcanzado por un líquido en un depósito.

A cada estado X se le puede asociar un flujo de entrada F_e y uno de salida F_s , de modo que la ecuación que representa su evolución es:

$$X(t) = X(0) + \int_0^t (F_e - F_s) dt \quad (2.12)$$

En el lenguaje STELLA, los Stocks son los “sustantivos” que se representan mediante rectángulos. La magnitud del stock nos indica lo que hay en un determinado tiempo. Operacionalmente funcionan como acumuladores y también como amortiguadores, posibilitando la entrada y la salida de flujos.

En la figura 2.17 se muestra como ejemplo un acopio de agregados como “stock actuando de amortiguador” para el flujo de consumir agregados.

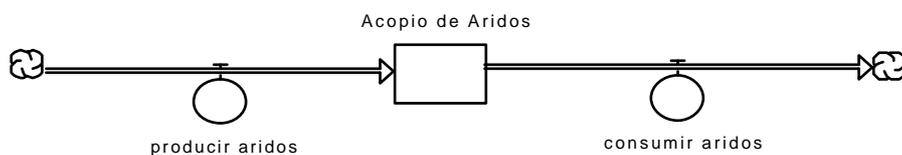


Figura 2.17: Ejemplo de Diagrama de Forrester para la producción de agregados.

Otra importante función de los Stock es actuar como “recursos” pudiendo ser de dos tipos recursos consumibles por los flujos, (materias primas, dinero, etc.) o recursos de producción, que son recursos involucrados en la generación de flujo y que no se consumen en el proceso, por ejemplo la creatividad genera innovaciones pero el acto de generar innovación no consume la creatividad.

Hay cuatro tipos de Stock en el lenguaje de Stella, en el contexto de esta tesis solo se utiliza el representado en la figura 2.18. Los otros se representan en las figuras: 2.19, 2.20 y 2.21:



Figura 2.18 Stock tipo embalses

Se lo utiliza para representar cualquier acumulación en donde no es importante para el propósito del modelo distinguir la diferencia de los lotes que se encuentran en el stock. Se lo utiliza generalmente para representar recursos consumible o de producción. Por ejemplo se considera stock de: material pétreo (recursos consumibles), mano de obra (recursos de producción), etc. Es el único tipo que se utiliza en este trabajo. Los otros que ofrece el modelo son:

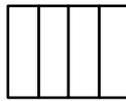


Figura 2.19: Stock tipo "conveyors"

Este tipo de Stock difiere del anterior en dos aspectos, el conveyors tiene varios parámetros asociados que pueden ejercer control en los ingresos y egresos de flujos, el más importante es el tránsito en el tiempo. Los materiales ingresan al "conveyor" y permanecen diferenciados. El flujo de materiales que se realiza durante un período de tiempo determinado no se mezcla con el material que ha fluido anteriormente.

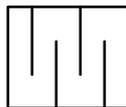


Figura 2.20: Stock tipo "queues"

Este tipo de stock retiene la integridad de los lotes, de tal forma que como entran salen.

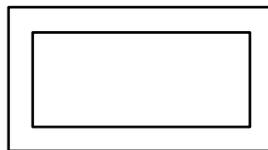


Figura 2.21: Stock tipo "Ovens"

Ovens abren sus puertas, admiten el material y luego cierran sus puertas y ejecutan. Admiten el material durante un tiempo específico o antes que la capacidad esté completa.

b. Nubes.

Las nubes muestran los límites del modelo. Un estado se puede alimentar desde otro estado, a través de la correspondiente variable de flujo o bien desde una fuente exterior al sistema. En este último caso si, además la fuente puede considerarse infinita, se representa en los gráficos por medio de nubes.

Un estado puede evacuar sobre otro estado, a través de la correspondiente variable de flujo, o sobre un pozo exterior al sistema. Si la capacidad del pozo es infinita, se representa por medio de una nube.

c. Flujo

Los flujos determinan las variaciones de los estados en un sistema. Las variables de flujo caracterizan las acciones que se toman en el sistema, las cuales quedan acumuladas en las correspondientes variables de estado; es decir, determinan cómo se convierte la información disponible en una acción.

A las variables de flujo se le asocian ecuaciones que definen el comportamiento del sistema. La entrada al flujo está dada por la información proveniente de los estados, o de las variables auxiliares del sistema y la salida alimenta un estado. Las ecuaciones asociadas a una variable de flujo reciben la denominación de ecuaciones de flujo o funciones de decisión. A todo estado se le asocia una variable de flujo, o incluso varias. En el lenguaje STELLA los flujos son los “verbos”.

Una forma frecuente de la ecuación de flujo es:

$$F(t) = T_n M(t) X(t) \tag{2.13}$$

En donde:

T_n = tasa normal

M= Multiplicador de flujo normal

Normalmente una variable de flujo dependerá no de una, sino de varias variables de acuerdo con una expresión de la forma:

$$F = f(V_1, V_2, \dots, V_n) \tag{2.14}$$

Es frecuente que esta dependencia pueda descomponerse multiplicativamente de modo que se obtenga:

$$F = f_1(V_1) \times f_2(V_2) \times \dots \times f_n(V_n) \tag{2.15}$$

Podemos resumir algunas consideraciones importantes de los flujos:

- Las variables de flujo están medidas por la unidad del estado que alimentan sobre el tiempo.
- Las variables de flujo tienen como entrada a estados y variables auxiliares, es decir dos variables de flujo no pueden conectarse entre sí.

- Una variable de estado no puede influir directamente a otra variable de estado sino a través del flujo que proporcione la primera.
- La dirección del flujo no implica la dirección de cambio del Stock. Sólo la magnitud relativa de los flujos determina el crecimiento o decrecimiento del stock.
- Los stocks y los flujos se encuentran juntos.

El flujo se representa mediante una tubería con una llave como se puede observar en la figura 2.22. El volumen del flujo se calcula por expresiones algebraicas y se considera para facilitar el entendimiento que volúmenes grandes causan que la llave se abra más y que cuando se trata de volúmenes bajos la llave se abre menos.

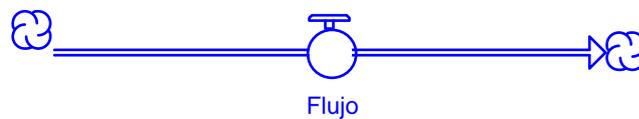


Figura 2.22: Representación en el lenguaje Stella del flujo.

Los flujos tienen los siguientes atributos:

- Las cosas que fluyen se conservan, en el sentido de que sólo cambia su ubicación dentro del sistema.
- En algunos casos existen flujos de cosas que pueden fluir hacia y desde un stock, en estos casos el flujo toma valores positivos y negativos. Se los denomina flujos bi-direccionales.
- Los flujos en general tienen la misma unidad que el stock, pero en algunos casos pueden realizar una conversión de unidades, en estos casos se los denomina flujo con unidad de conversión. Se representan como se ilustra en la figura 2.23 en la cual se muestra cómo del stock de masa de agregados a través del flujo producción se transforma en volumen de hormigón.



Figura 2.23: Representación de un flujo con conversión de unidades.

Siempre se deben verificar en el lenguaje STELLA que las unidades de los flujos y el stock sean las mismas. Cuando se utilizan flujos usando convertidores se debe considerar que esto suceda en el proceso real que se está modelando.

d. Convertidores

Los convertidores son variables auxiliares que representan pasos o etapas en los que se descompone el cálculo de una variable de flujo a partir de los valores tomados por los estados. Se representan mediante círculos como muestra la figura 2.24.

Las variables auxiliares unen los canales de información entre variables de estado y de flujo, son parte de las variables de flujo. Sin embargo, se distinguen de ellas en la medida en que tengan un significado real por sí mismas, o sencillamente porque hacen más fácil la comprensión de las ecuaciones de flujo.

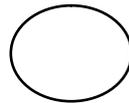


Figura 2.24: Representación de un convertidor-

En el lenguaje sistémico funcionan frecuentemente como “adverbios”, modificando actividades (verbos) dentro del sistema. Además sirven para otras funciones relacionadas con los stock, los flujos y con condiciones externas. No puede haber una conexión cerrada entre convertidores, como se muestra en la figura 2.28.

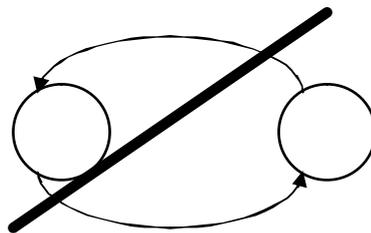


Figura 2.25: Vinculación entre dos convertidores.

e. Conectores

Las variables de estado y de flujo están asociadas entre sí por medio de conectores, que pueden ser canales de materiales, o información. Se representan mediante una flecha. Los conectores no pueden vincularse con un stock, sólo los flujos modifican el stock.

Los conectores no representan flujo, sino que vinculan:

- Stock con convertidores,
- Stock con flujos,
- Flujos con flujos,.
- Convertidores con flujos,
- Convertidores con convertidores,

2.4.6. Consideraciones generales del diagrama de Forrester

- Cualquier trayecto a través del diagrama de un sistema debe encontrar alternativamente estados y flujos y nunca dos variables del mismo tipo en sucesión, excepto que se trate de variables auxiliares.
- Debe considerarse que los procesos fundamentales que tienen lugar en un sistema pueden ser caracterizados por flujos y por estados. Por ejemplo los flujos de producción de agregados reciclados se acumulan en acopios representados en stock. En este contexto es claro que integración es sinónimo de acumulación.
- Aunque el flujo y la integración son inherentes a los sistemas, solamente se puede observar la integración. Los flujos son instantáneos y sólo pueden ser medidos como promedio en un determinado periodo. Las integraciones cobran un interés singular, puesto que son las variables que pueden ser medidas y que suministran las bases prácticas para la actuación sobre el sistema.

2.4.7. Simulación computacional de la dinámica de sistemas

Existen programas comerciales como el STELLA³⁴ que se aplica en este trabajo que permiten construir los diagramas de Forrester y además solucionan el sistema de ecuaciones diferenciales, para determinados datos del modelo. Aracil y Gordillo²⁹ clasifican los datos utilizados en dinámica de sistemas en tres tipos:

- **Constantes o datos estáticos:** Son parámetros que no varían con el tiempo y se definen con un valor.
- **Valores numéricos que definen las funciones no lineales:** en dinámica de sistemas es usual definir las relaciones no lineales entre distintas variables por medio de tablas de valores que quedan caracterizadas por una serie de datos numéricos.
- **Datos dinámicos** $x(t_1), x(t_2, \dots)$, corresponden a variables x que cambian de valor a lo largo del tiempo pero que no son calculadas en el modelo, sino que son datos.

2.5. Referencias

¹ RILEM Recommendation (1994). "121-DRG Guidance for demolition and reuse of concrete and masonry. Specifications for concrete with re recycle aggregates". Materials and Structures, N° 27.

² Hansen, T.C. (1992). "Recycled of demolished concrete and masonry". Report of Technical Committee 37–DRC Demolition and Reuse of Concrete. USA

³ Gómez Soberón. J.M.V. *et al.* (2001). “Hormigones con agregados reciclados. Una guía de diseño para el material”, CIMNE, España.

⁴ <http://www.var.nl/index.html>

⁵ <http://www.bardontmount.com>

⁶ Di Maio, A.A. Gutiérrez F y Traversa L.(2001). “Comportamiento físico-mecánico de hormigones elaborados con agregados reciclados”. 14 Reunión técnica AATH, Tomo II, Olavarría, Argentina.

⁷ Zega C. y Di Maio A.A. (2003). “Influencia de las Características de los Agregados Reciclados en la Elaboración de Hormigones”. 15º Reunión Técnica AATH, Santa Fe, Argentina.

⁸ Di Maio A.A. *et al.* (2002). “Hormigones con agregados reciclados”. Revista Ciencia y Tecnología, Nº 9. La Plata, Argentina.

⁹ Hernández C. y Fornasieri G. (2005). “Caracterización de hormigones elaborados con agregados grueso reciclado”. Revista Hormigonar, Nº 7 año 3. Argentina.

¹⁰ Tonda M., *et al.* (2008) “Reciclado de hormigón sin preselección en origen”. III Congreso Internacional y 17ª reunión Técnica de la Asociación Argentina de tecnología del Hormigón, Córdoba, Argentina.

¹¹ Zega Claudio *et al.* (2008) “Elaboración de hormigones reciclados empleando restos de hormigones de corte”, III Congreso Internacional y 17ª reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Córdoba, Argentina.

¹² Di Maio A. L. y Traversa, L.P. (2003). “Difusión de cloruros en hormigones reciclados”. Revista Ciencia y Tecnología, Nº 10. La Plata, Argentina.

¹³ Zega C. (2003). “Hormigones con agregados reciclados: evaluación mediante métodos vibratoriales”. Revista Ciencia y Tecnología, Nº 10. La Plata, Argentina.

¹⁴ Durán G. y Cúneo Simian, H. (1995). “Propiedades mecánicas y físicas de los hormigones con agregados reciclados”. XII Reunión Técnica “Dra. Haydee V. Armandola”, AATH, La Plata, Argentina.

¹⁵ Durán G. *et al.* (1996). “Proyecto de pliego general de especificaciones técnicas para la recepción de hormigones normales para la Municipalidad de Córdoba”. Córdoba, Argentina.

¹⁶ Durán G. *et al.* (1997). “Pliego general de especificaciones técnicas particulares para las obras de hormigones de la empresa CTi. MÓVIL”, Córdoba, Argentina.

- ¹⁷ Durán G. *et al.* (2005). "Elaboración de hormigones con agregados gruesos reciclados, en el marco de la norma IRAM 30100, guía de interpretación de la IRAM-ISO 9001:2000 en la construcción". COMPAT 2005, VIII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y X Congreso de Control de Calidad en la Construcción. Asunción, Paraguay.
- ¹⁸ González-Fonteboa *et al.* (2005). "Hormigones con agregados reciclados: estudio de propiedades de los agregados y de las mezclas". Revista Materiales de construcción. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid, España.
- ¹⁹ Aguilar *et al.* (2007). "Caracterización del hormigón elaborado con agregados reciclados producto de la demolición de estructuras de hormigón" Materiales de Construcción, Vol. 57. España.
- ²⁰ Forster Stephen (1986) "Recycled concrete as aggregate" Concrete International. EE UU
- ²¹ Hernández C. y Fornasier G. (2005), "Caracterización de hormigones elaborado con agregado grueso reciclado", Revista Hormigonar de la Asociación Argentina del Hormigón Elaborado. Argentina.
- ²² Environmental Council of Concrete Organizations. <http://www.ecco.org>
- ²³ Porter, A. L. *et al.* (1991), "Forecasting and management of technology". A Wiley-Interscience, EEUU.
- ²⁴ Medina Vásquez J., y Ortegón, E. (2006). "Manual de prospectiva y decisión estratégica: bases teóricas e instrumentos para América latina y el Caribe". CEPAL, Publicaciones de las Naciones Unidas, Chile.
- ²⁵ Comisión Española (2001), "Primera Parte: Introducción y Metodología", Publicación del Observatorio de Prospectiva Tecnológica Industrial. España,
- ²⁶ Gavigan, J. P. y Cahill, E. (1997) "Overview of recent European and non-European National Technology Foresight Studies". Institute for Prospective Technological Studies of Seville. España.
- ²⁷ Herrera A. *et al.* (2004) "¿Catástrofe o Nueva Sociedad? Modelo Mundial Latinoamericano. treinta años después" IIED. Argentina.
- ²⁸ Godet M. (1993) "De la anticipación a la acción, Manual de prospectiva". Ediciones Alfa omega. Barcelona.
- ²⁹ Aracil J y Gordillo F. (1997) "Dinámica de sistemas", Alianza Editorial, Madrid, España

³⁰ Von Bertalanffy Ludwig (1976) “Teoría General de los Sistemas, fundamentos, desarrollo y aplicaciones”. Editorial Fondo de Cultura Económica. México.

³¹ <http://www.systemdynamics.org/>

³² Senge P. ,(1994) “La Quinta Disciplina, Cómo impulsar el aprendizaje en la organización inteligente”, Ediciones Granicas, Buenos Aires..

³³ Mejida A. y Martiza Díaz G.(2007), “Tipos de arcos y hacia dónde disparan: Sobre la naturaleza y posibilidades de los arquetipos”
http://www.prof.uniandes.edu.co/~jmejia/PDF/tipos_de_arcos.pdf

³⁴ HPS (1994) *Stella Research 5.0*, High Performance Systems, Hanover, NH, USA.

Capítulo 3

Metodología

Este capítulo describe la metodología empleada en la tesis para la realización del análisis prospectivo. La metodología que se aplica es la de los escenarios con enfoque normativo, propuesta originalmente por Wladimir Sachs y modificada por Miklos y Tello¹. La misma se compone de cuatro etapas en constante interacción, que se sintetizan a continuación:

- Etapa normativa: Se explicita el futuro deseado.
- Etapa definicional: Se elabora el modelo que representa la realidad, en el cual se toman las decisiones para hacer más factible el futuro deseado.
- Etapa de confrontación: Se contrastan los resultados de las etapas anteriores.
- Etapa de determinación estratégica y factibilidad: en la que se definen los futuros posibles, mostrándose opciones políticas concretas.

3.1. Etapa normativa

Como se trata de minimizar el efecto de utilizar un recurso no renovable en el que los desechos no son tratados, las medidas requieren ser implementadas lo antes posible, por lo que el futuro deseable se fija para un horizonte temporal corto de cinco años que es un plazo para el que se percibe la “frontera de lo visible”.

El futuro deseado requiere un cambio de visión que se explicita en función de la relación con el ambiente, los residuos de hormigón, los agregados reciclados y los hormigones con agregados reciclados.

3.1.1. Ambiente

En relación al medio ambiente se espera una población sensibilizada con la necesidad de considerar las partículas minerales naturales, procedentes de la desintegración natural o de la trituración de rocas no sólo como un bien comercial como los demás, sino un patrimonio que se debe proteger y tratar como un desarrollo más sustentable.

3.1.2. Residuos de hormigón

El futuro demanda un enfoque integrado y holístico en el sector de la construcción en relación a los ciclos de vida de la construcción, lo que involucra la vida después de servicio. Con políticas que permitan evitar la contaminación de los desechos de hormigón, para lo que se requiere un sistema de gestión de residuos de hormigón, entendiendo como tal los procesos de demolición, recolección, transporte, recuperación y eliminación, incluida la vigilancia de estas operaciones, así como la vigilancia de los lugares de descarga. Probablemente se deberán implementar instrumentos económicos en la política de residuos de hormigón, tales como penalidades por la contaminación de residuos, beneficios impositivos para las empresas que favorezcan el proceso de reciclado, etc.

3.1.3. Agregados reciclados y hormigones con agregados reciclados

Se pretende que la tecnología de los agregados reciclados y la de los hormigones con agregados reciclados alcancen gran difusión para lo cual se necesita la existencia de normas y reglamentos que favorezcan la utilización.

Los productores de agregados naturales y los de hormigones con agregados naturales deben participar en el proceso de reciclado del hormigón para la obtención de AR y HAR. Probablemente estos cambios requieren de instrumentos económicos que favorezcan la utilización y la producción de los AR y los HAR.

3.2. Etapa definicional

Se delimitó el sistema actual, en el cual se toman las decisiones que nos acercan a un futuro deseado. El sistema se compone de tres subsistemas:

- Subsistema desarrollo y adopción.
- Subsistema productor.
- Subsistema obras de hormigón.

3.2.1. Subsistema desarrollo y adopción

Los actores de este subsistema están compuestos por distintos sujetos e instituciones que actúan favoreciendo la demanda de hormigón y/o regulan su elaboración y utilización.

3.2.1.1. Desarrollo

Para seleccionar un indicador de este sector se analizó el desarrollo de la industria de la construcción, y de la industria del hormigón, observando la fuerte dependencia del crecimiento económico. Como indicador del crecimiento económico en el modelo se utiliza el Producto Interior Bruto (PIB) o Producto Bruto Interno (PBI) que es la macro-magnitud económica más importante para la estimación de la capacidad productiva de una economía.

EL PBI es el valor monetario total de la producción corriente de bienes y servicios de un país durante un período determinado (normalmente es un trimestre o un año); es una magnitud de flujo, que contabiliza sólo los bienes y servicios producidos durante la etapa de estudio y no contabiliza los bienes o servicios que son fruto del trabajo informal (trabajo doméstico, intercambios de servicios entre conocidos, etc.)

En la figura 3.1 se representa la evaluación del PIB en Argentina desde el año 1993 hasta 2007. El análisis comparativo de la evolución del PBI y de la producción de cemento Pórtland, que se muestra en figura 3.2, permite apreciar que en los periodos de crecimiento o disminución del PBI, también crece o disminuye la producción de cemento, esto ocurre debido a que la producción de cemento es esencialmente para consumo interno. A su vez, la producción de cemento es un indicador del volumen de producción del hormigón.

Como se dispone de registros del PBI y es necesario estimar la demanda de hormigón, en este trabajo se considera que el crecimiento del PBI implica en igual medida un aumento de la demanda de hormigón y que un decremento del PBI implica una disminución de la demanda de hormigón.

En los últimos treinta años, el país tuvo en promedio un año de caída por cada año de crecimiento, de modo que el resultado ha sido una resignación del ingreso nacional equivalente a más del 55% del PBI actual. Se estima que se producirá un crecimiento sostenido para los próximos 10 años².

3.2.1.2. Adopción

El área de adopción está formada por todos los organismos, nacionales, provinciales, municipales y particulares que establecen los requisitos de los materiales componentes, elaboración y utilización del hormigón.

En Córdoba no existe la obligatoriedad de adoptar ningún reglamento ni normativa para la realización de obras de estructuras de hormigón. Algunas obras tienen pliegos de especificaciones técnicas, en donde se explicitan requisitos obligatorios de cumplir. Muchas veces en éstos se hace referencia a reglamentos tales como el CIRSOC y normas IRAM. Como parte de esta investigación, se ha

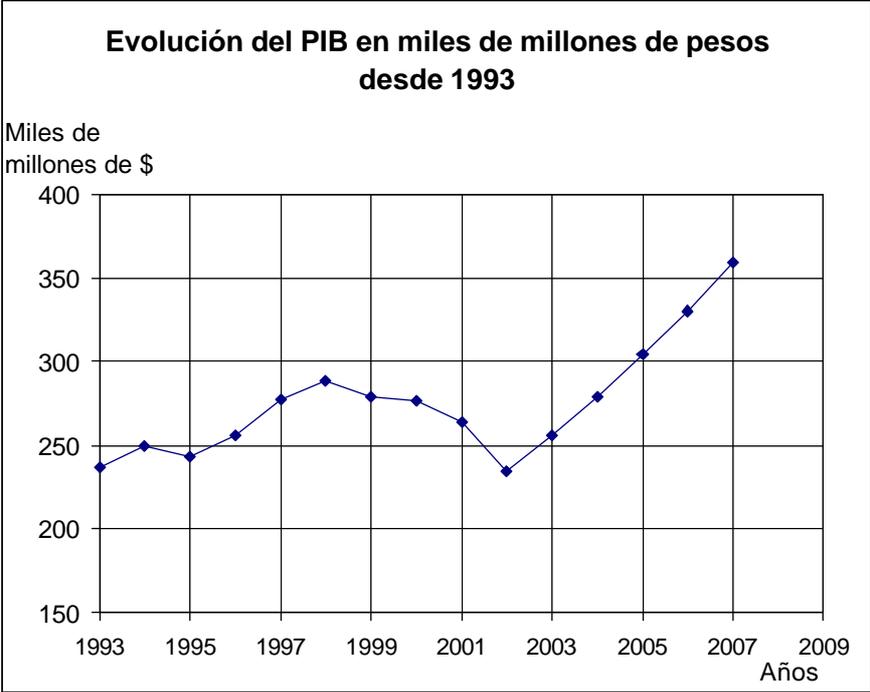


Figura 3.1. Evolución en Argentina del PBI. Fuente³

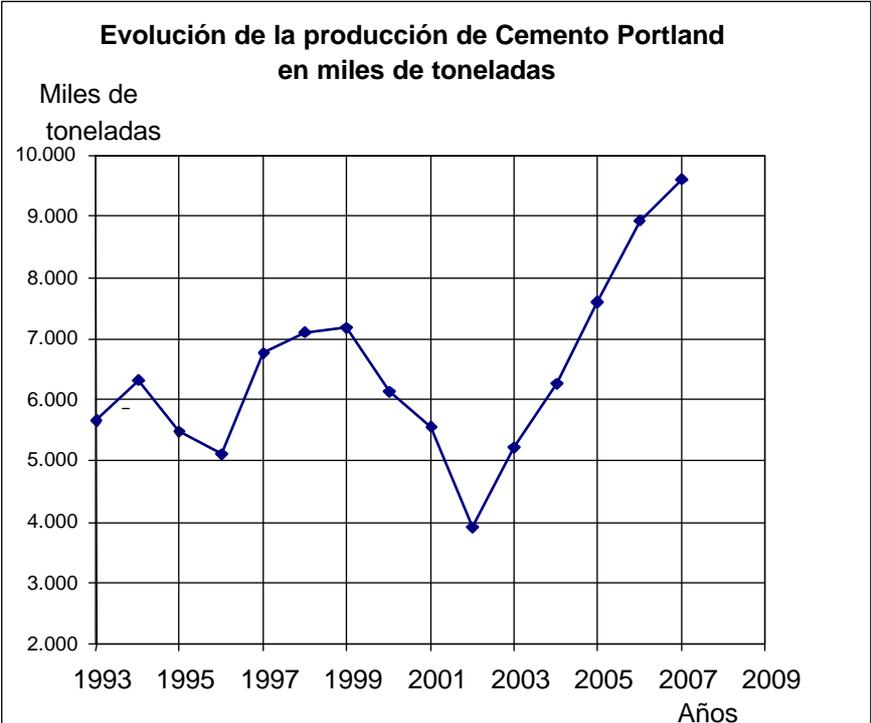


Figura 3.2. Evolución de la producción de cemento Pórtland en Argentina. Fuente⁴

Instrumentos regulatorios	Año de edición	Contempla la utilización de agregados reciclados para la elaboración de hormigones
Norma IRAM 1531: 1990, Agregados gruesos para hormigones de cemento Pórtland.	1990	No
Norma IRAM 1517: 1988, Agregados. Clasificación y descripción de las rocas más comunes y de sus minerales constituyentes.	1988	No
Reglamento CIRSOC 201-M: 2004. Proyecto, cálculo y ejecución de estructuras de hormigón armado y pretensado.	2004	No
Reglamento CIRSOC 201- y Anexos. Proyecto, cálculo y ejecución de estructuras de hormigón armado y pretensado	1982	No
Pliego de la Municipalidad		No
Pliego: "Obra de pavimento urbano tipo 1" Ciudad de Córdoba. Provincia de Córdoba Ministerio del Interior de la Nación. Programa de Desarrollo Integral de Grandes Aglomerantes Urbanos del Interior (Volumen de hormigón 25.000 m ³)	2006	No
Pliego general de especificaciones técnicas particulares para las obras de hormigones de la empresa Cti Móvil	1997	Si
Proyecto de pliego general de especificaciones técnicas para la recepción de hormigones normales para la Municipalidad de Córdoba.	1996	Si
Acindar Adquisición de aprox. 14.000 m ³ de H		No especifica tipo de agregado, sólo sus características granulométricas.

Tabla 3.1. Instrumentos regulatorios.

realizado un relevamiento de los reglamentos, normas y pliegos de especificaciones técnicas más difundidos, con el objeto de detectar si se contemplaba la utilización de agregados reciclados para la elaboración de hormigones con agregados reciclados en forma parcial o total. El resultado de esta búsqueda se muestra en la tabla 3.1.

Del relevamiento se infiere que en los instrumentos regulatorios más difundidos no se contempla la utilización de los agregados reciclados para la elaboración de hormigones. Este aspecto genera una debilidad para la difusión del

producto, ya que no sólo no resulta factible de utilizar en las obras reguladas con los instrumentos analizados, sino que disminuye la confiabilidad del mismo.

En relación a las leyes sobre la preservación del medio ambiente vinculadas a la explotación de las canteras, el Gobierno de la Provincia de Córdoba sancionó el 29/6/85 la ley Nº 7343⁵, "*Principios rectores para la preservación, conservación, defensa y mejoramiento del ambiente*". En el Capítulo III referido a los suelos, esta ley establece los criterios para el uso del suelo, la clasificación, etc. sin especificaciones particulares sobre la explotación de las canteras. En el Capítulo VII de la citada ley, referida al paisaje establece: "*Deberá regularse todo tipo de acción, actividad u obra que pudiere transformar el paisaje. Los responsables de tales actos, actividades u obras deberán presentar ante las autoridad de aplicación un informe donde detallen las medidas para evitar la degradación incipiente, corregible e irreversible de los paisajes*". Esta ley manifiesta un carácter de intencionalidad en relación a la producción de agregados y no tiene un carácter regulatorio. El Decreto Nº 2131, reglamentario del capítulo IX "*Del Impacto Ambiental*" de la Ley 7343 del año 2002, establece un sistema de evaluación del impacto ambiental, e incorpora el concepto de auditoría ambiental que incluye tres tipos de auditoría: de cumplimiento, en el proceso de evaluación de impacto ambiental y en el proceso de cierre de instalaciones. Además, establece la obligatoriedad de presentar estudios de impacto ambiental para proyectos que degraden o sean susceptibles de degradar o alterar el medio ambiente. También establece en el artículo 25º, los criterios de calidad ambiental que se consideran válidos, que son los indicados por normas provinciales y nacionales vigentes, en caso de no cubrir éstas los requerimientos que pudiesen hallarse bajo análisis de la Agencia Córdoba Ambiente Sociedad del Estado, deberán seleccionarse los valores más estrictos entre los recomendados por organismos de prestigio internacional en la materia, tales como: programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), Organización Mundial de la Salud (OMS); Oficina Panamericana de la Salud (OPS); Comunidad Económica Europea (CEE); Agencia de Protección del Ambiente de los EE UU (EPA); y el Consejo Federal del Ambiente de la República Federal Alemana. En este decreto también se indica que los proyectos vinculados a la extracción de rocas y de minerales en domino privado deben presentar en forma obligatoria un estudio de impacto ambiental.

Los actores de este sector también son las instituciones públicas o privadas con infraestructura y personal capaz de realizar investigaciones, asesoramiento y control de obras de hormigones con agregados reciclados. En la tabla 3.2 se muestra las principales instituciones relevadas de la ciudad de Córdoba.

3.2.2. Subsistema productor

Este subsistema está compuesto por actores que producen hormigón y agregados.

3.2.2.1. Productores de hormigón

Los productores de hormigón se diferencian por la metodología utilizada en la elaboración, lugar de producción y volumen de hormigón. Estos productores pueden ser:

- **Productores de hormigón en obra**

Son empresas constructoras o pequeños productores que cuentan con tecnología adecuada para producir hormigón. Los componentes del hormigón son acopiados, clasificados, dosificados, mezclados y transportados por el constructor en el obrador o en un lugar cercano a la obra para auto abastecimiento. En general, son obras que demandan poco volumen de hormigón y que consumen en su mayoría cemento en bolsa. En la tabla 3.3 y en la figura 3.3 se observa que la tendencia actual es la disminución del consumo de cemento en bolsa y el incremento del consumo de cemento a granel, lo que nos permite inferir que esta metodología de producción de hormigón es inferior al 50% del volumen de hormigón total que se produce en Córdoba. En países como EEUU, Japón o Alemania, esta forma de producción no supera el 20% del total del hormigón producido.

Instituciones	Experiencia en Hormigones con agregados reciclados
Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.	si
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba	si
Laboratorio de Obras Viales de la Municipalidad de Córdoba	no
Laboratorio de vialidad de la Provincia de Córdoba	no
Laboratorio y Centro Técnico del grupo Minetti (Empresas productoras de cemento y hormigón elaborado)	no
Laboratorio de la Empresa Hormiblock. (Empresa productora de hormigón elaborado)	no

Tabla 3.2. Instituciones de Investigación. Fuente: relevamiento de la autora.

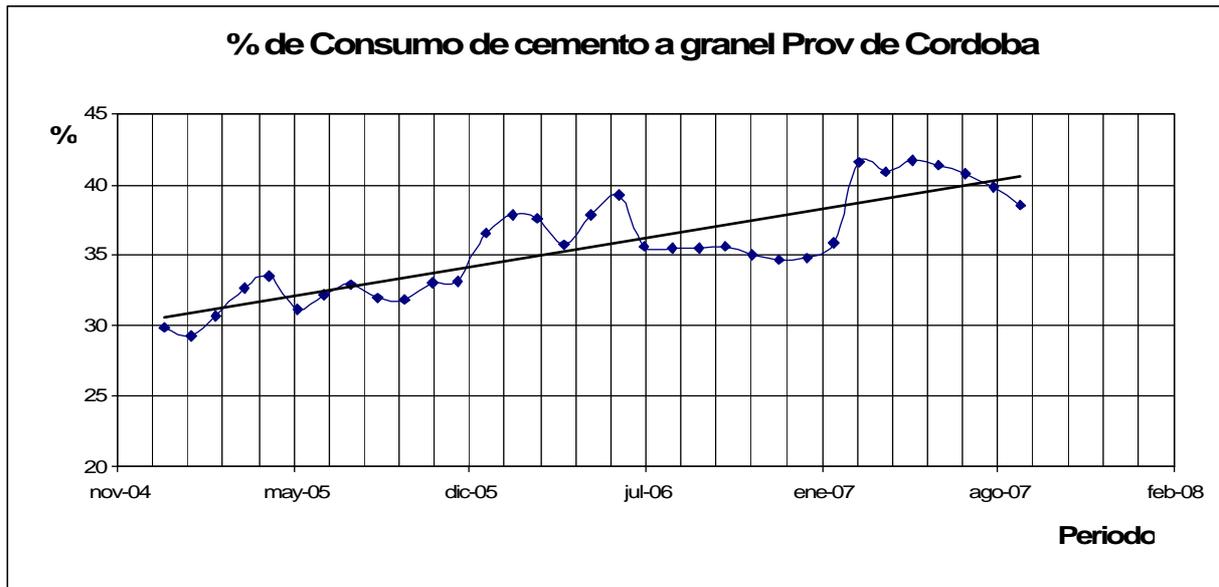


Figura 3.3: Evolución del consumo de cemento a granel en la Provincia de Córdoba.

○ **Productores de elementos premoldeados de hormigón**

Este conformado por empresas que producen elementos de hormigón en un establecimiento industrial en donde los componentes del hormigón son acopiados, clasificados, dosificados, mezclados, moldeados y curados. En la tabla 3.4 se muestran las principales empresas, la participación aproximada del mercado y su experiencia en producir hormigones con agregados reciclados.

○ **Productores de Hormigón Elaborado**

El hormigón elaborado se entiende como: *“el hormigón dosificado gravimétricamente en planta industrial, mezclado en moto hormigonera o en planta central, para ser entregado en estado fresco, antes de iniciar su fraguado, en las condiciones de calidad convenidas, sin que sea necesario otro tratamiento previo a su uso.”*⁶

La industria del hormigón elaborado comenzó en Córdoba en los años 70 a través de empresas familiares. Alrededor del año 2000 una empresa multinacional líder del negocio del cemento compró empresas cementeras y de hormigón elaborado, logrando una participación en el mercado entre el 40 al 50 %.

En la tabla 3.5 se muestran las empresas productoras de hormigón elaborado de la ciudad Córdoba, su participación en el mercado y la experiencia en producir hormigones con agregados reciclados.

En la Provincia de Córdoba hay empresas de hormigón elaborado en las principales ciudades, tales como Río IV y Villa María. En los lugares de la provincia

en donde no existen plantas de hormigón elaborado pero se realizan obras de gran volumen y alejadas de aproximadamente más de 50 Km. es factible que las empresas de hormigón elaborado ofrezcan la posibilidad de instalar plantas móviles de hormigón en el predio o en la cercanía a la obra.

Periodo	Cemento en bolsa		Cemento a granel		Total
	tn	%	tn	%	Tn
ene-05	44394	70	18938	30	63332
feb-05	42630	71	17688	29	60318
mar-05	46826	69	20771	31	67597
abr-05	49732	67	24117	33	73849
may-05	50459	67	25355	33	75814
jun-05	52049	69	23522	31	75571
jul-05	50666	68	24029	32	74695
ago-05	60201	67	29559	33	89760
sep-05	63379	68	29722	32	93101
oct-05	59127	68	27702	32	86829
nov-05	58675	67	28926	33	87601
dic-05	54754	67	27128	33	81882
ene-06	48657	63	27970	37	76627
feb-06	46979	62	28545	38	75524
mar-06	54695	62	33038	38	87733
abr-06	53222	64	29641	36	82863
may-06	55818	62	34058	38	89876
jun-06	54969	61	35560	39	90529
jul-06	60273	64	33416	36	93689
ago-06	66230	65	36365	35	102595
sep-06	66016	64	36375	36	102391
oct-06	63283	64	34974	36	98257
nov-06	65175	65	35139	35	100314
dic-06	55230	65	29386	35	84616
ene-07	52915	65	28252	35	81167
feb-07	56351	64	31545	36	87896
mar-07	47614	58	33899	42	81513
abr-07	50720	59	35022	41	85742
may-07	61862	58	44296	42	106158
jun-07	59546	59	41975	41	101521
jul-07	60117	59	41464	41	101581
ago-07	72848	60	48350	40	121198
sep-07	61490	61	38532	39	100022

Tabla 3.3: Modalidad de consumo de cemento en Córdoba. Fuente⁴

Empresas de hormigón premoldeado	% aproximado de participación en mercado de hormigón prefabricado	Utilización de hormigones elaborado con agregados reciclados
Astori	35-40	No
Pretensa	35-40	No
Stumpf premoldeados	1-3	No
Galara	1-3	No
Pretencord	1-3	No

Tabla 3.4: Antecedentes de la uso de hormigones con agregados reciclados en premoldeado. Fuente: Entrevista personal de la autora.

Principales empresas de hormigón elaborado	% aproximado de participación en el mercado del hormigón elaborado	Utilización de hormigones elaborado con agregados reciclados
Hormigones Minetti	50	No
Hormiblock S.A.	40	No
Incoser	5	No
Hormigones Córdoba	5	No

Tabla 3.5: Antecedentes del uso de hormigones con agregados reciclados en la industria del hormigón elaborado. Fuente: Entrevista personal de la autora.

En base a la figura 3.3 y lo expuesto, se observa que el consumo de hormigón elaborado tiende a crecer, principalmente debido a la ventaja técnico-económica que presenta. Por lo tanto, en el modelo de este estudio, los actores que se incluyen en la producción del hormigón son los productores de hormigón elaborado y los productores de elementos premoldeados de hormigón. Estos no sólo son los potenciales productores de hormigón con agregados reciclados sino que, en función de las investigaciones realizadas por Hornung² y de entrevistas y experiencia de la autora, se estima que el volumen de hormigón residual en plantas de hormigón elaborado está entre el 2% y el 3% de su producción. Esto convierte a estos productores en piezas claves, ya que son productores de hormigón elaborado (que es un producto que compite comercialmente con el hormigón con agregados reciclados), potenciales productores de hormigón con agregados reciclados y generadores de desechos de hormigón que constituye la materia prima para la producción de agregados reciclados. Además, los productores de hormigón elaborado de Córdoba son empresas confiables para sus consumidores, poseen una alta fidelidad de los clientes, por lo que introducir una innovación tecnológica a través de ellos favorecerá la difusión.

3.2.2.2. Productores de agregados

Los agregados son componentes del hormigón formados por partículas de minerales naturales, procedentes de la desintegración natural o de la trituración de rocas, con forma, tamaño y distribución de tamaños apropiados. Los actores de este subsistema son empresas dedicadas a la extracción, trituración y clasificación de material pétreo. Estos actores también son relevantes para el propósito de este estudio por disponer de infraestructura para la producción de agregados reciclados ya que el método básico para la obtención de agregados reciclados es triturar y clasificar los restos de demoliciones de estructuras de hormigón para obtener un producto granular de tamaño determinado. Además, producen Agregados naturales que compiten comercialmente con los agregados reciclados.

El relevamiento de los principales productores de agregados y la experiencia en la producción de agregados reciclados se muestran en la tabla 3.6.

Canteras	Trituro hormigones para la obtención de agregados reciclados
Gran Ombú	No
Michelloti	No
San Nicolás	No
Diquecito	No
Cantesur	No
Coarsa	No
San Agustín	No
Suquia	No
El bajo	No
Bertinatti	No
Amadeo	No

Tabla 3.6: Productores de Agregados. Fuente relevamiento de la autora.

3.2.3 Subsistema obras de hormigón

Este subsistema se caracteriza por tener dos tipos de actores: los consumidores de hormigón y los demolidores de obras de hormigón fuera de servicio.

3.2.3.1. Consumidores de hormigón

Son entidades públicas o privadas que compran el hormigón para ser utilizado como material de construcción. Pueden o no ser expertos en hormigón, lo que implica que muchas veces utilicen el hormigón que el productor de hormigón elaborado de confianza les recomienda. En general las obras de mayor demanda de hormigón (presas, pavimentos, etc.) pertenecen al estado. A título ilustrativo la Municipalidad de Córdoba consume más de 6200 m³ de agregados gruesos al año para hormigón-.

En este sector se observan las siguientes tendencias:

- Mayor exigencia en calidad de productos.
- Mayores controles de calidad.
- Estructuras más osadas.
- Tiempos de obras más exigentes y cada vez más cortos.
- Alta competitividad entre empresas constructoras.

3.2.3.2 Demolidores de obras de hormigón fuera de servicio

Los actores de este subsistema son los propietarios de obras privadas o públicas que se encuentran fuera de servicio por razones tales como: obras obsoletas, con fallas, cambio de destino del lugar de emplazamiento, etc. y los encargados de realizar las demoliciones que son entidades pública o privadas especializadas.

Se ha realizado una investigación bibliográfica y entrevistas a diferentes asociaciones vinculadas a la industria del cemento, el hormigón y la construcción en Argentina con el objeto de determinar el volumen de desechos de hormigón. El resultado muestra que ninguna asociación dispone de datos sobre el volumen de desechos de hormigón. Esta falta de registro también se produce en la Comunidad Europea⁷. Esta carencia de información es una dificultad para realizar el modelo. Como resultado de la entrevista, ingenieros del área de obras viales de la Municipalidad de Córdoba estiman que en la ciudad, en los últimos años, se demuelen entre 4.000 y 10.000 m³ de calzadas de hormigón.

Otro problema se presenta para la cuantificación en este subsistema es que el promedio de los períodos de servicio en estructuras de hormigón son inciertos⁸. Además, muchos desechos de estructuras de hormigón son contaminados por elementos extraños como: plásticos, vidrios, metales y papeles. Para Buchinger *et al.*⁹ la industria de la construcción genera desechos muy heterogéneos, por lo que la recolección y clasificación de residuos representan desafíos particulares para el reciclaje.

3.3. Etapa de confrontación

En función del futuro deseado y del análisis de la realidad, las principales dificultades para alcanzar las metas propuestas son:

- Falta de normativas y reglamentos para los AR y los hormigones con agregados reciclados, por lo que su uso implica asumir por parte del profesional responsable compromisos del tipo legal.
- Falta de instrumentos económicos que fomenten el reciclado de hormigón.

- Falta de regulación sobre las operaciones de demolición y acopio de desechos.
- Costo de agregados naturales en la zona, a bajo precio debido principalmente a la cercanía entre los centros de producción y de consumo, por lo que el costo de transporte tiene una baja incidencia en el precio final del producto a diferencia de otras regiones del país. En la tabla 3.7 se observa la incidencia del costo del transporte en el precio final de los agregados.
- Falta de divulgación de la tecnología de los hormigones con agregados reciclados a los productores, constructores y los usuarios finales.
- Reticencia por parte de los usuarios a cambiar procesos y materiales ya aprobados y experimentados.

Paralelamente, hay importantes potencialidades que favorecen alcanzar el futuro deseado:

- Gran cantidad de plantas productoras de Agregados.
- Importantes centros de investigación y educativos.
- Crecimiento de la demanda de hormigón.
- Tendencia a mejorar y valorar el cuidado del medio ambiente.

Zona	Tipo de transporte	Incidencia del costo del transporte en el precio final de la tonelada de agregado
Córdoba	Camión	36%
Santa Fé	Camión	190%
Rosario	Camión	220%
Rosario	Ferrocarril	160%

Tabla 3.7: Incidencia del costo del costo del transporte en el precio de los agregados. Fuente, entrevista personal realizada por la autora.

3.4. Etapa de determinación estratégica y factibilidad

En este trabajo se entiende el término “estrategia” como las actividades y actitudes que se deben adoptar para conseguir un objetivo. Para definir una estrategia para lograr la difusión de los hormigones con agregados reciclados se establecen los siguientes supuestos básicos:

- Crecimiento continuo del PBI para la frontera temporal del estudio de un 5% anual (continuando la tendencia actual), con una inversión bruta que asegure el mismo crecimiento en la industria de la construcción. Estudios realizados por la Cámara Argentina de la Construcción¹⁰ destacan que las variaciones

del crecimiento de la industria de la construcción siguen puntualmente las del PBI pero su amplitud triplica generalmente la del PBI. Para sostener el crecimiento de la industria de la construcción es necesario el crecimiento del PBI e inversiones en la industria de la construcción.

- Fluida comunicación entre los actores del sistema.

Las acciones y actitudes que constituyen la estrategia se explicitan a continuación según cada subsistema:

3.4.1 Subsistema desarrollo y adopción

- Investigar y desarrollar tecnología de los hormigones con agregados reciclados por parte de los centros de investigación.
- Transferir conocimientos entre los centros de investigación y los organismos de regulación.
- Transferir conocimientos entre los centros de investigación y el sector productivo.
- Transferir conocimientos entre los organismos de regulación y el sector productivo.
- Desarrollar normas y reglamentos sobre agregados reciclados y hormigones con agregados reciclados.
- Desarrollar normas y reglamentos sobre demolición de estructuras de hormigón.
- Implementar beneficios impositivos para las industrias productoras de hormigón elaborado y de Agregados para favorecer la utilización de los hormigones con agregados reciclados.

3.4.2. Subsistema productor

Se establecen acciones diferenciadas para los productores de Agregados y los productores de hormigón.

3.4.2.1. Productores de agregados

Dado que los agregados reciclados compiten comercialmente con los agregados naturales, la estrategia consiste en fomentar la producción de agregados reciclados por parte de los productores de agregados naturales.

Según el Comité 37-DRC de la Rilem¹¹, Buchinger *et al.*⁸, Gomez Soberón¹², Kasai¹³, la producción de agregados reciclados requiere esencialmente equipamiento para la eliminación de contaminantes y el equipamiento básico para la producción de agregados normales necesario para las operaciones de clasificación y reducción de tamaño, así como para la carga y transporte del materia. El layout de las plantas para la producción de agregados reciclados no difiere de las de producción de agregados naturales. Como la cantidad de mortero adherido al agregado original es el causante del incremento de absorción y de la inestabilidad volumétrica, el proceso de trituración de los desechos de hormigón es fundamental. Para obtener agregados reciclados con poco volumen de mortero adherido y forma

cúbica, Kasai recomienda que en la trituración primaria se usen trituradoras del tipo de mandíbulas o impacto y como trituradoras secundarias recomienda las de mandíbula, impacto o cono.

Factibilidad económica

Las etapas de demolición y transporte desde los lugares de demolición hasta las plantas productoras de Agregados incrementan el costo de los Agregados reciclados en relación a los Agregados naturales. Entonces, para lograr la factibilidad económica, se proponen las siguientes acciones:

- Crear beneficios impositivos para que los productores de agregados naturales también produzcan Agregados reciclados.
- Otorgar valor agregado a las empresas que se adhieran a la producción de Agregados reciclados con una imagen simbólica distintiva que represente la colaboración en un proceso de reciclado.
- Instrumentar espacios para el acopio de desechos de hormigón en las plantas productoras de Agregados, con el objeto de disminuir el costo de transporte en la producción de Agregados reciclados.

Factibilidad técnica

Para determinar la factibilidad técnica se elaboran hormigones con los Agregados naturales del tipo más frecuente utilizados en la zona. Posteriormente se trituran para producir agregados reciclados.

Los hormigones originales se elaboran con distinto tipo de Agregados grueso naturales identificados como:

- Agregado Original 1, identificado como: AN1
- Agregado Original 2, identificado como: AN2
- Agregado Original 3, identificado como: AN3
- Agregado Original 4, identificado como: AN4

La caracterización de los mismos se realiza en función de lo establecido en la Norma IRAM 1531¹⁴. Los resultados se muestran en las tablas 3.8, 3.9, 3.10 y 3.11 y en las figuras 3.4, 3.5, 3.6, y 3.7 se ilustra su distribución granulométrica.

Para la obtención de los Agregados reciclados se tritura por compresión los hormigones originales realizado con los Agregados AN1, AN3 y AN4, logrando los agregados reciclados denominados AR1, AR3 y AR4.

En una planta productora de agregados naturales de la Provincia de Córdoba, se trituran y clasifican por tamaño desechos de hormigones elaborados provenientes de los desechos de una planta de hormigón elaborado con el agregado original identificado como AN2. Los desechos son fraccionados mediante una trituradora

primaria de mandíbula, obteniendo un agregado reciclado denominado AR2, cuya granulometría está comprendida entre los 19 mm y 2,4 mm.

En todos los casos se elimina el polvo y material fino por medio de un proceso de lavado y tamizado a través del tamiz 4,75 mm.

Considerando que los agregados de originales cumplen los requisitos técnicos para ser utilizados en la elaboración de hormigones, se determina en los Agregados reciclados las características físicas que más se modifican en el proceso de reciclado y que no son eliminadas en el proceso de lavado.

En las tablas 3.12, 3.13, 3.14 y 3.15 se muestran las características de los Agregados reciclados y en las figuras 3.8, 3.9, 3.10, y 3.11 las curvas granulométricas de los mismos. De los resultados de ensayo se observa:

- Disminución de la densidad de los agregados reciclados en relación a los agregados originales entre el 6 y el 9%, debido al mortero adherido al agregado lo que también produce un aumento significativo de la absorción.
- Bajo la hipótesis que el volumen de mortero adherido en los agregados reciclados es el mismo en todos los tipo de agregados trabajados y planteando un sistema de ecuaciones con dos incógnitas. La primera ecuación relaciona que el volumen del agregado reciclado AR1, esta formado por una parte de agregado original más una parte de morteros y la segunda ecuación igual pero para el agregado AR3, el volumen de mortero adherido al agregado original es del orden del 20%.
- La absorción de los agregados originales resultaron entre un 12 a un 27 % de la absorción del agregado reciclado, es decir de 3,7 a 8,5 veces mayor la absorción de los AR en relación a los AN. El incremento de los valores de absorción se explica por el mortero original adherido que se encuentra el agregado reciclado.
- Menor resistencia al desgaste en los agregados reciclados en relación a los agregados original. Esto se puede atribuir a dos causas: la primera debida a las microfisurciones generadas en los agregados durante el proceso de reciclado y la segunda por la poca resistencia al desgaste del mortero adherido al agregado.
- Solamente en el agregado reciclado AR3 el coeficiente de forma mejora en relación al agregado original esto se pude deber a la forma lajosa y elongada del agregado original.
- Luego del proceso de triturado de los hormigones originales y del proceso de lavado las curvas granulométricas de los agregados reciclados se encuentran dentro de las curvas límites.

Denominación: Agregado Original 1 – Triturado Granítico				
Identificación: AN1				
Procedencia: La Calera – Córdoba				
Tamaño máximo nominal: 19 mm				
Requisitos IRAM 1531 “AGREGADOS GRUESOS PARA HORMIGONES DE CEMENTO PORTLAND”				
Requisitos	Unidad	Valor muestra	Máximo	Método de ensayo
Terrones de arcilla y partículas friables	g/100g	No presenta	2	IRAM 1647
Material que pasa a través el tamiz 75 micrones.	g/100g	0.25	1	IRAM 1540
Sulfatos expresados como SO ₃	g/100g	0.04	0.075	IRAM 1647
Otras sales solubles	g/100g	0.05	1.5	IRAM 1647
Durabilidad por ataque con sulfato de sodio	g/100g	4.2	12	IRAM 1525
Examen petrografía	No reactivo			IRAM 1649
Desgaste	g/100g	22	50	IRAM 1532
OTROS ENSAYOS				
Propiedad	Unidad	Valor muestra	Método de ensayo	
Densidad relativa del agregado en condición s.s.s.		2.76	IRAM 1533	
Absorción	%	0.7	IRAM 1533	
Coefficiente de forma		0.4	UNE 7238	

Tabla 3.8: Características agregado original 1.

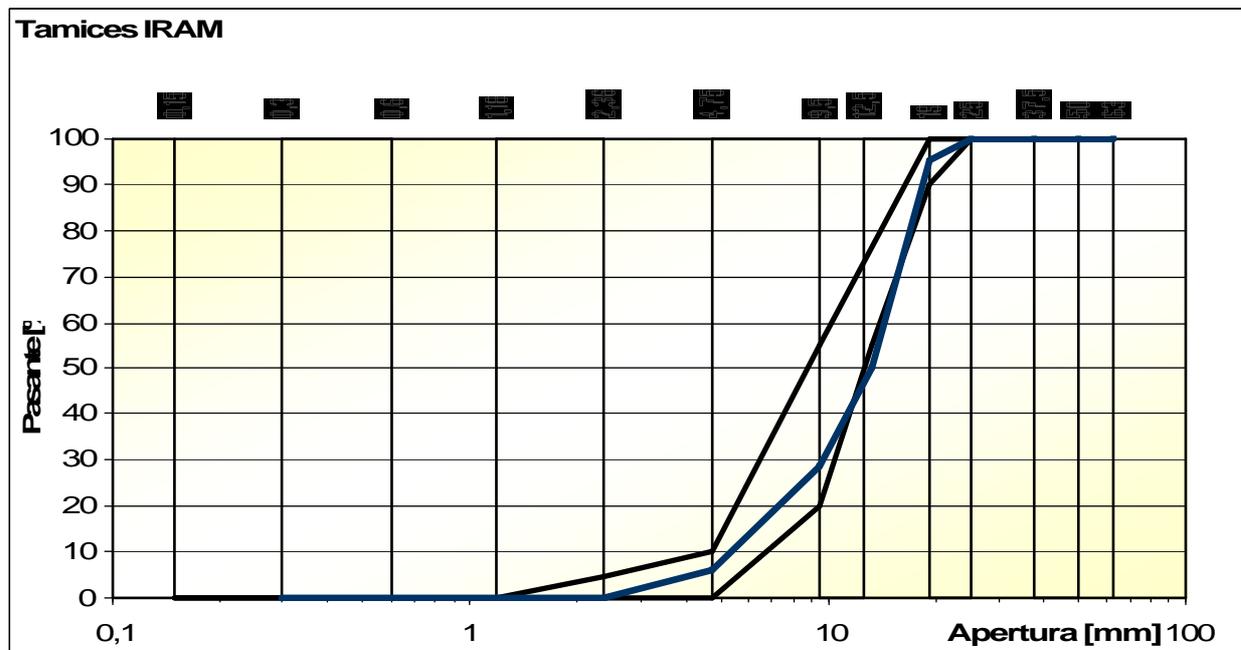


Figura: 3.4: Granulometría AN1- Curvas límites según norma IRAM 1627.

Denominación: Agregado Original 2 – Canto Rodado Triturado				
Identificación: AN2				
Procedencia: Riío Suquia - Córdoba				
Tamaño máximo nominal: 26,5 mm				
Requisitos IRAM 1531 “AGREGADOS GRUESOS PARA HORMIGONES DE CEMENTO PORTLAND”				
Requisitos	Unidad	Valor muestra	Máximo	Método de ensayo
Terrones de arcilla y partículas friables	g/100g	No presenta	2	IRAM 1647
Material que pasa a través el tamiz 75 micrones.	g/100g	0.3	1	IRAM 1540
Sulfatos expresados como SO ₃	g/100g	0.03	0.075	IRAM 1647
Otras sales solubles	g/100g	0.04	1.5	IRAM 1647
Durabilidad por ataque con sulfato de sodio	g/100g	5.77	12	IRAM 1525
Examen petrografía	No reactivo			IRAM 1649
Desgaste	g/100g	37	50	IRAM 1532
OTROS ENSAYOS				
Propiedad	Unidad	Valor muestra	Método de ensayo	
Densidad relativa del agregado en condición s.s.s.		2.65	IRAM 1533	
Absorción	%	0.8	IRAM 1533	
Coeficiente de forma		0.42	UNE 7238	

Tabla 3.9: Características agregado original 2.

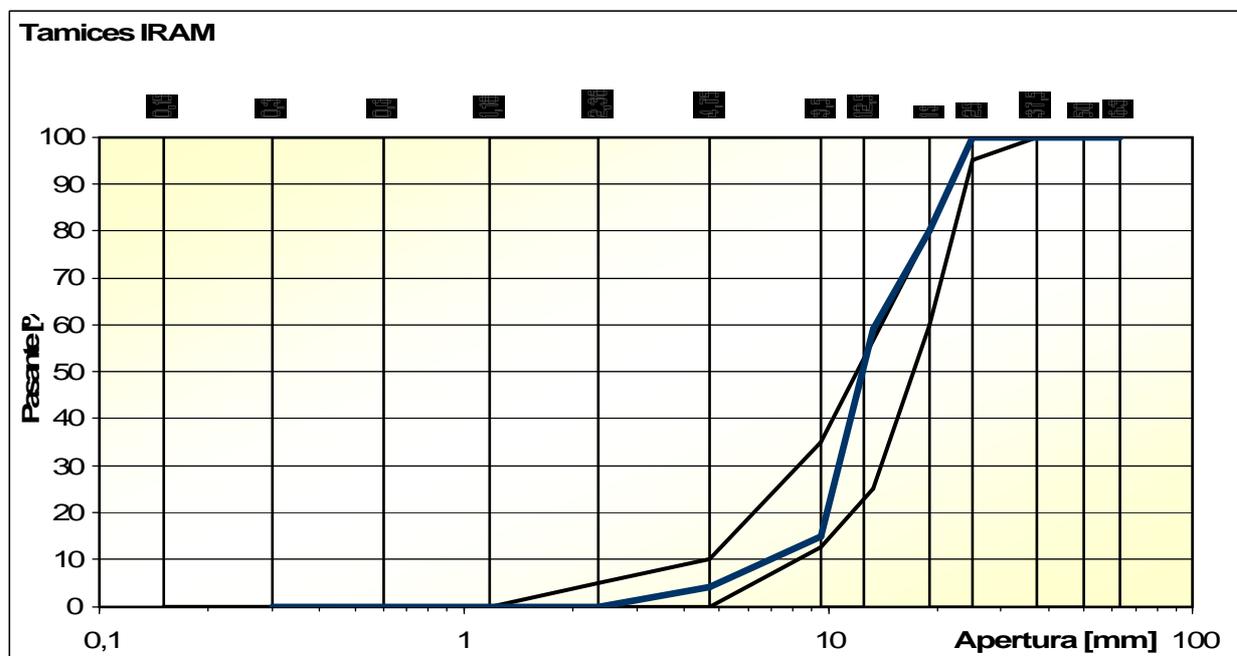


Figura: 3.5: Granulometría AN2- Curvas límite según norma IRAM 1627

Denominación: Agregado Original 3 – Triturado Basáltico				
Identificación: AN3				
Procedencia: Berrotarán - Córdoba				
Tamaño máximo nominal: 19 mm				
Requisitos IRAM 1531 “AGREGADOS GRUESOS PARA HORMIGONES DE CEMENTO PORTLAND”				
Requisitos	Unidad	Valor muestra	Máximo	Método de ensayo
Terrones de arcilla y partículas friables	g/100g	No presenta	2	IRAM 1647
Material que pasa a través el tamiz 75 micrones.	g/100g	0.4	1	IRAM 1540
Sulfatos expresados como SO ₃	g/100g	0.001	0.075	IRAM 1647
Otras sales solubles	g/100g	0.006	1.5	IRAM 1647
Durabilidad por ataque con sulfato de sodio	g/100g	4.25	12	IRAM 1525
Examen petrografía	No reactivo			IRAM 1649
Desgaste	g/100g	21	50	IRAM 1532
OTROS ENSAYOS				
Propiedad	Unidad	Valor muestra	Método de ensayo	
Densidad relativa del agregado en condición s.s.s.		2.9	IRAM 1533	
Absorción	%	1.57	IRAM 1533	
Coeficiente de forma		0.12	UNE 7238	

Tabla 3.10: Características agregado original 3.

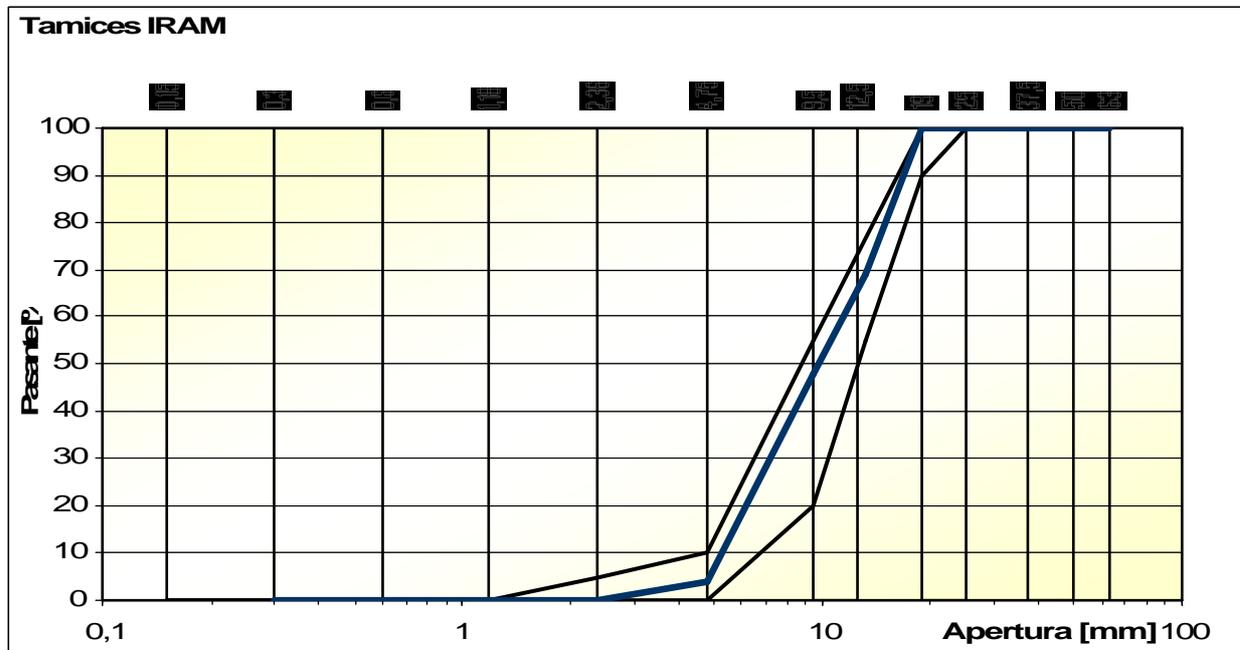


Figura: 3.6: Granulometría AN3- Curvas límites según norma IRAM 1627

Denominación: Agregado Original 4 – Triturado Granítico				
Identificación: AN4				
Procedencia: Malagueño - Córdoba				
Tamaño máximo nominal: 19 mm				
Requisitos IRAM 1531 “AGREGADOS GRUESOS PARA HORMIGONES DE CEMENTO PORTLAND”				
Requisitos	Unidad	Valor muestra	Máximo	Método de ensayo
Terrones de arcilla y partículas friables	g/100g	0.04	2	IRAM 1647
Material que pasa a través el tamiz 75 micrones.	g/100g	0.8	1	IRAM 1540
Sulfatos expresados como SO ₃	g/100g	0.05	0.075	IRAM 1647
Otras sales solubles	g/100g	0.02	1.5	IRAM 1647
Durabilidad por ataque con sulfato de sodio	g/100g	2.02	12	IRAM 1525
Examen petrografía	No reactivo			IRAM 1649
Desgaste	g/100g	17.5	50	IRAM 1532
OTROS ENSAYOS				
Propiedad	Unidad	Valor muestra	Método de ensayo	
Densidad relativa del agregado en condición s.s.s.		2.71	IRAM 1533	
Absorción	%	0.68	IRAM 1533	
Coefficiente de forma		0.39	UNE 7238	

Tabla 3.11: Características agregado original 4.

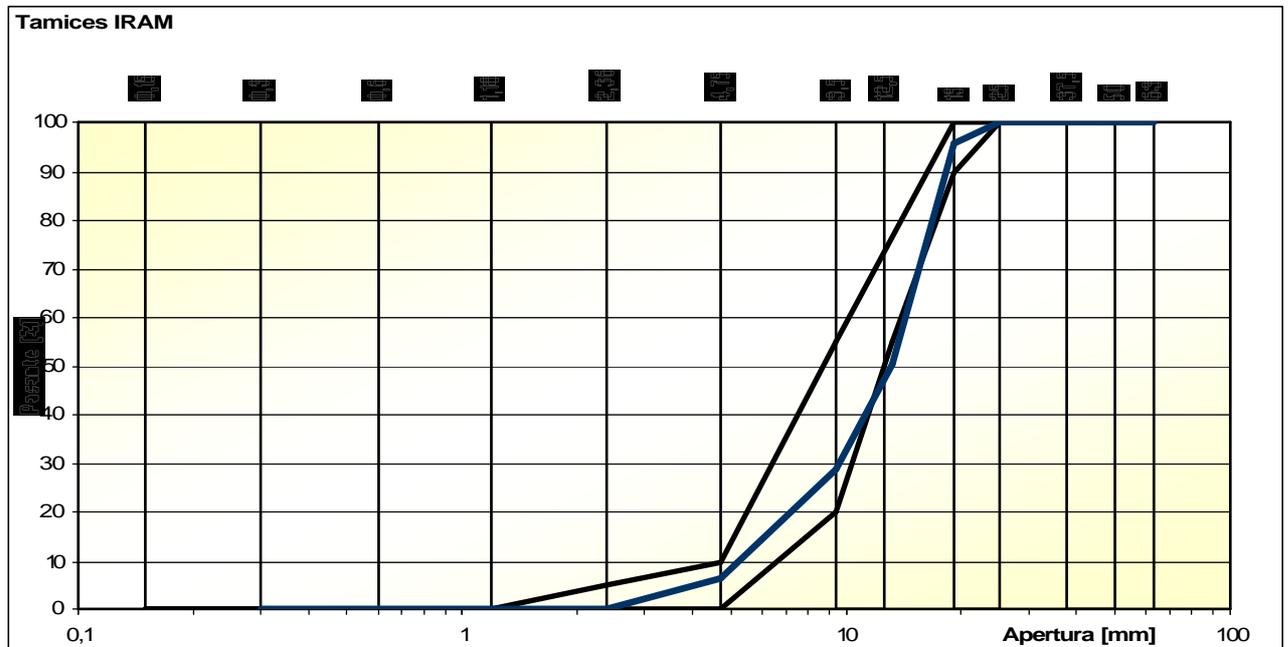


Figura: 3.7: Granulometría AN4- Curvas límites según norma IRAM 1627

En la tabla 3.16 se muestran las relaciones entre las propiedades de los agregados originales y los agregados reciclados

Denominación: Agregado Grueso Reciclado 1				
Identificación: AR1				
Procedencia: Trituración agregado original 1				
Tamaño máximo nominal: 19 mm				
Característica	Unidad	Valor muestra	Máximo	Método de ensayo
Desgaste	g/100g	29.2	50	IRAM 1532
OTROS ENSAYOS				
Propiedad	Unidad	Valor muestra	Método de ensayo	
Densidad relativa del agregado en condición s.s.s.		2.55	IRAM 1533	
Absorción	%	5.45	IRAM 1533	
Coeficiente de forma		0.23	UNE 7238	

Tabla 3.12: Características agregado reciclado 1.

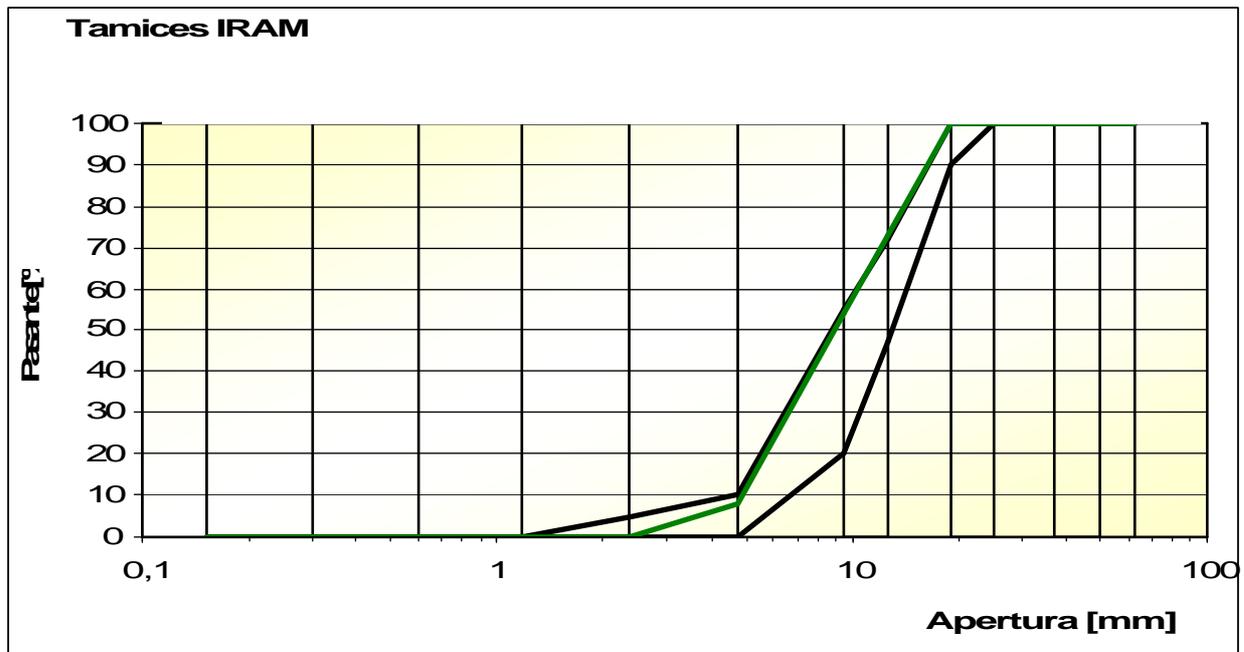


Figura: 3.8: Granulometría AR1- Curvas límites según norma IRAM 1627

Denominación: Agregado Grueso Reciclado 2				
Identificación: AR2				
Procedencia: Trituración agregado original 2				
Tamaño máximo nominal: 19 mm				
Característica	Unidad	Valor muestra	Máximo	Método de ensayo
Desgaste	g/100g	42,5	50	IRAM 1532
OTROS ENSAYOS				
Propiedad	Unidad	Valor muestra	Método de ensayo	
Densidad relativa del agregado en condición s.s.s.		2.45	IRAM 1533	
Absorción	%	6,83	IRAM 1533	
Coeficiente de forma		0.21	UNE 7238	

Tabla 3.13: Características agregado reciclado 2.

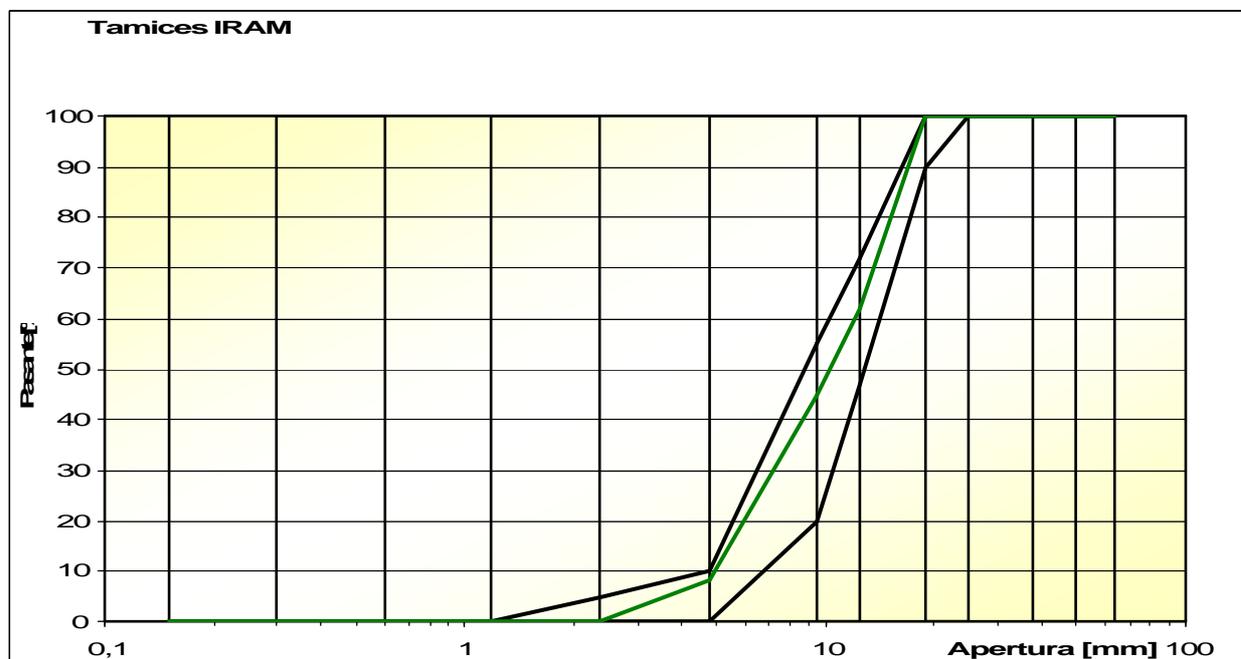


Figura: 3.9: Granulometría AR2- Curvas límites según norma IRAM 1627

Denominación: Agregado Grueso Reciclado 3				
Identificación: AR3				
Procedencia: Trituración agregado original 3				
Tamaño máximo nominal: 19 mm				
Característica	Unidad	Valor muestra	Máximo	Método de ensayo
Desgaste	g/100g	31.9	50	IRAM 1532
OTROS ENSAYOS				
Propiedad	Unidad	Valor muestra	Método de ensayo	
Densidad relativa del agregado en condición s.s.s.		2.66	IRAM 1533	
Absorción	%	5.79	IRAM 1533	
Coeficiente de forma		0.18	UNE 7238	

Tabla 3.14: Características agregado reciclado 3.

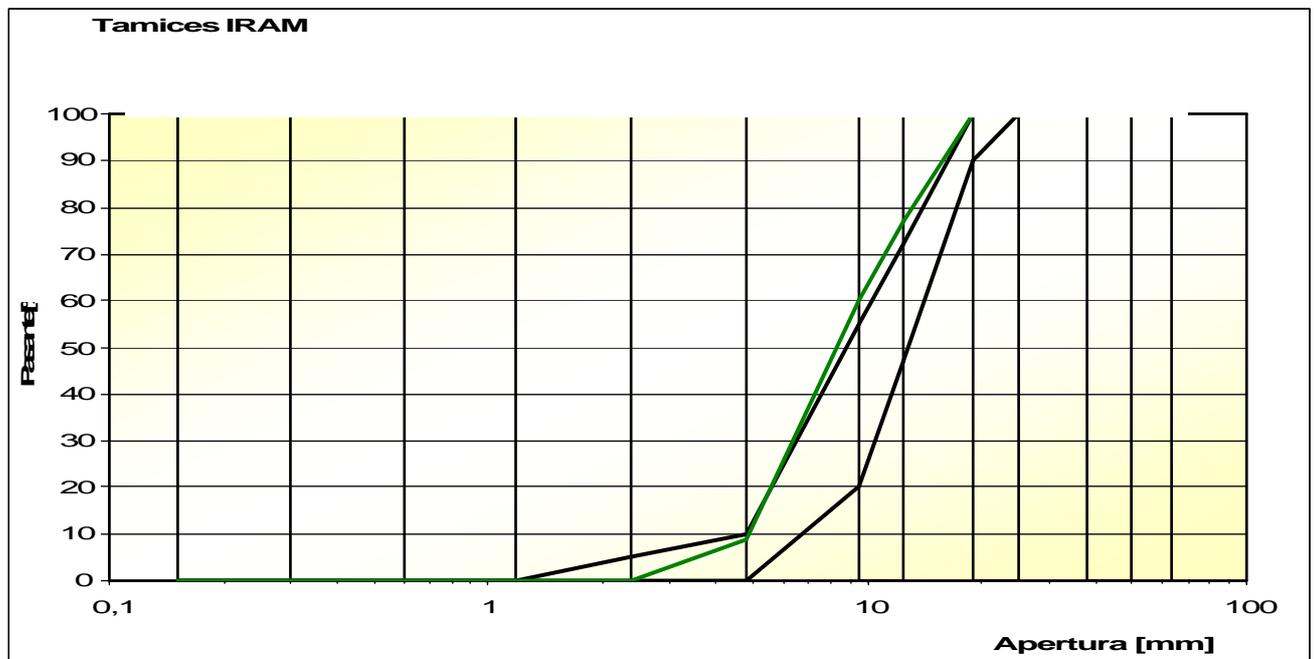


Figura: 3.10: Granulometría AR3- Curvas límites según norma IRAM 1627

Denominación: Agregado Grueso Reciclado 4				
Identificación: AR4				
Procedencia: Trituración agregado original 4				
Tamaño máximo nominal: 19 mm				
Característica	Unidad	Valor muestra	Máximo	Método de ensayo
Desgaste	g/100g	22.7	50	IRAM 1532
OTROS ENSAYOS				
Propiedad	Unidad	Valor muestra	Método de ensayo	
Densidad relativa del agregado en condición s.s.s.		2.55	IRAM 1533	
Absorción	%	4.85	IRAM 1533	
Coeficiente de forma		0.26	UNE 7238	

Tabla 3.15: Características agregado reciclado 4.

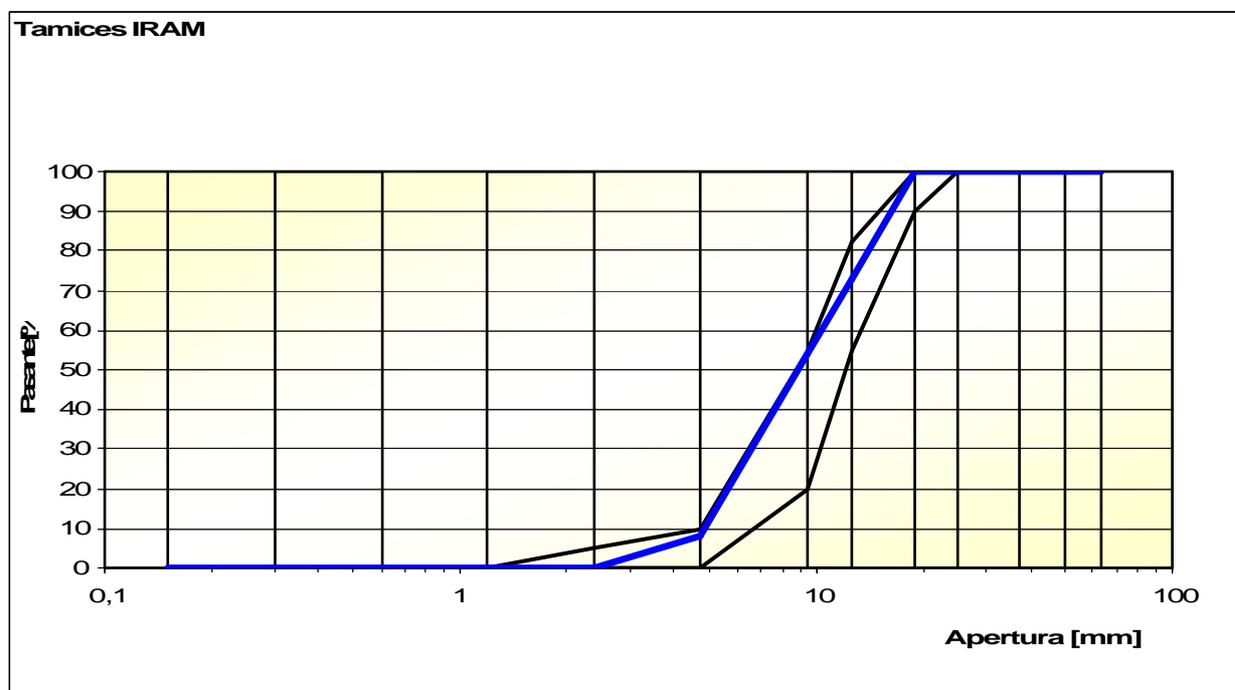


Figura: 3.11: Granulometría AR4- Curvas límites según norma IRAM 1627

Agregados	Relación entre propiedades			
	Densidad relativa	Absorción	Desgaste de los ángeles	Coefficiente de forma
AN1/AR1	1,08	0,13	0,75	1,74
AN2/AR2	1,08	0,12	0,87	2,00
AN3/AR3	1,09	0,27	0,66	0,67
AN4/AR4	1,06	0,14	0,77	1,5

Tabla 3.16: Relación entre las propiedades de los agregados originales y los agregados reciclados.

3.4.2.2. Productor de hormigones con agregados reciclados

Al igual que en el caso de los agregados, los hormigones con agregados reciclados compiten comercialmente con los hormigones con agregados naturales. Por tal razón, la estrategia consiste en fomentar la producción de hormigones con agregados reciclados desde un punto de vista técnico y otro económico.

Factibilidad Económica

Para lograr la factibilidad económica se proponen las siguientes acciones:

- Crear beneficios impositivos para que los productores de hormigón con agregados naturales también produzcan hormigones con Agregados reciclados.
- Otorgar valor agregado a las empresas que se adhieran a la producción de hormigones con Agregados reciclados con una imagen simbólica distintiva que represente la colaboración en un proceso de reciclado.

Factibilidad Técnica

Experiencias internacionales⁹ y nacionales¹⁵ muestran que la elaboración a nivel industrial de hormigones con agregados reciclados requiere la misma infraestructura que la necesaria para hormigones con Agregados natural si los desechos no están contaminados. También señalan que se pueden aplicar los mismos procedimientos en las etapas de colocación, compactación y curado del hormigón.

En la actualidad no hay normativas para los hormigones con agregados reciclados y los procesos de normalización, requieren de un tiempo que puede ser superior al límite temporal establecido para este análisis. Se contempla entonces la posibilidad de adoptar un sistema de gestión de la calidad por parte de las empresas productoras de hormigón elaborado con el objeto asegurar la calidad de los hormigones con agregados reciclados y otorgarles confianza a los usuarios.

Un sistema de gestión de la calidad es en este contexto una expresión de la manera en que la organización productora de hormigón elaborado desea que se entreguen sus productos y servicios, para satisfacer las necesidades de los clientes. Para esto se utiliza como marco normativo la IRAM 30100, guía de interpretación de la IRAM-ISO 9001:2000 en la construcción¹⁶.

Esta norma *“promueve la adopción de un enfoque basado en los procesos cuando se desarrolla, implementa y mejora la eficacia de un sistema de gestión de la calidad, para aumentar la satisfacción del cliente mediante el cumplimiento de sus requisitos”*. Los objetivos son especificar los requisitos para un sistema de gestión de la calidad, cuando una organización: *“a) necesita demostrar su capacidad para proporcionar de forma coherente productos que satisfagan los requisitos del cliente y los reglamentarios aplicables, y b) aspira a aumentar la satisfacción del cliente a través de la aplicación eficaz del sistema, incluidos los procesos para la mejora continua del sistema y el aseguramiento de la conformidad con los requisitos del cliente y los reglamentos aplicables”*¹³. Para esto la organización debe: identificar los procesos necesarios, determinar la secuencia e interacción de estos procesos, establecer criterios y métodos para el control y seguimiento¹⁷.

El sistema de gestión de la calidad establecido en la norma, se basa en cuatro ejes fundamentales e interrelacionados:

- Responsabilidad de la dirección.
- Gestión de los recursos.
- Realización del producto, medición análisis y mejora.

La documentación general que se requiere es:

- Declaraciones documentadas de política de la calidad y objetivos de la calidad.
- Manual de la calidad, el cual debe contener; alcance del sistema, procedimientos documentados o referencia a ellos y Flujograma de procesos.
- Procedimientos documentados requeridos para el control de documentos y el de los registros.
- Documentación para la planificación, operación y control de los procesos.
- Registros.

En el siguiente análisis se desarrollan los puntos que demandan un tratamiento diferenciado para la producción de hormigones con agregado reciclado en relación con los hormigones elaborados con agregados convencionales.

En el contexto de una empresa productora de hormigón elaborado se identifican tres tipos de clientes:

- **Clientes indirectos:** No son usuarios o beneficiarios directos del producto, pero se ven afectados por el impacto ambiental de la industria. El principal requisito que demandan estos clientes a la empresa productora, es generar el menor impacto ambiental.
- **Clientes directos:** Usuarios o beneficiarios directos del producto y servicio hormigón elaborado incluyendo los hormigones con agregados reciclados. cuyos requisitos se pueden clasificar en:
 - Atributos del servicio: Entrega en tiempo y forma, servicio pre y post venta, asesoramiento técnico, atención personalizada y diversidad de entrega del producto (bombeado del hormigón, etc.).
 - Características del producto: Volumen, resistencia, temperatura, consistencia, densidad, componentes aptos para el hormigón, diversidad de producto, adecuación del producto a las características de la obra y requisitos técnicos reglamentarios.
- **Clientes internos:** Son todos los miembros de la empresa productora involucrados en el sistema de gestión de la calidad, cuyos requisitos fundamentales son los recursos necesarios para el desarrollo de sus actividades en un adecuado ambiente de trabajo.

Política de la calidad: involucrar a todos los miembros de la organización dentro de un sistema de calidad, para satisfacer las necesidades de los clientes de la organización productora de hormigón elaborado.

En este marco, la organización se compromete a:

- Contribuir con un desarrollo ambiental sano y sostenible.
- Favorecer la recuperación de recursos no renovables.
- Privilegiar el uso de tecnologías que impliquen el menor consumo posible de materias primas y energías, con la menor producción de residuos y cualquier clase de contaminación.
- Diseñar procesos controlados y eficaces para lograr productos de calidad predecible.
- Transformar las expectativas y necesidades de nuestros clientes en requisitos de productos.
- Proveer los recursos necesarios para lograr nuestros objetivos.
- Mantener un sistema documental asociado al sistema de gestión de la calidad, cuyos atributos evidencien: transparencia, confidencialidad, seguridad y accesibilidad de la información protegida.
- Valorar el trabajo y la participación de todos los miembros de la organización como integrantes de un equipo que contribuyen a la cadena de valor del producto final.
- Medir para revisar y mejorar con objetividad los estándares de la calidad.

Objetivos de la calidad

- Mejorar el nivel de satisfacción de los clientes directos, indirectos e internos.
- Mejorar la calidad de los procesos.
- Evaluar técnicamente a proveedores y utilizar siempre materiales que cumplan los requisitos técnicos de aptitud.
- Realizar los estudios y ensayos previos necesarios, con suficiente anticipación para optimizar la elaboración del hormigón.
- Cumplir con los requisitos especificados en la parte II y III de la norma IRAM 1666 “Hormigón Elaborado”⁵
- Contar con equipos adecuados y confiables para la elaboración, transporte y entrega del hormigón.
- Implementar un sistema de mantenimiento preventivo.
- Poseer un sistema metrológico que asegure la calidad de las mediciones.

Responsabilidad de la dirección

- Satisfacer los requisitos de los clientes: directos, indirectos e internos y reglamentarios.
- Proveer los recursos necesarios para asegurar la calidad en los procesos.
- Lograr el compromiso de los miembros de la organización para la mejora continua.
- Establecer la política de calidad.
- Establecer los objetivos de la calidad.
- Revisar el sistema de gestión de la calidad.
- Transformar las expectativas y necesidades de los clientes en requisitos del producto.

Flujograma del proceso esencial

En la figura 3.12 se muestra el flujograma que esquematiza el proceso esencial para la producción de hormigón con agregados reciclados. Todos los productos y procesos deben tener un plan de inspección, ensayos y registro que permita un análisis para la toma de decisiones.

Los agregados reciclados (AR) pueden utilizarse sustituyendo parcial o totalmente los Agregados naturales, pero en todos los casos se requiere de inspección y ensayo que se indican con líneas de puntos en el flujograma.

Se adoptan los requisitos de: material que pasa a través del tamiz IRAM 75 μm , sulfatos, otras sales solubles, lajosidad, durabilidad, desgaste y sustancia reactivas según las limitaciones y metodología de evaluación que establece la norma IRAM 1531¹² además de los requisitos propuesto por Kasai¹³ que se muestran en la tabla 3.17.

Las operaciones de acopio y manipuleo de los materiales, dosificación, carga y mezclado en moto-hormigonera, transporte, inspección y ensayo del hormigón

fresco, elaboración de muestras para ensayar el hormigón endurecido y entrega, no difieren esencialmente entre los hormigones con Agregados naturales y los hormigones con Agregados reciclados.

Flujograma de la documentación asociada al proceso esencial de hormigones con agregados reciclados

En la figura 3.13 se presenta un esquema del proceso documental asociado al proceso esencial. El plan de control nutre de información para las diferentes instancias de inspección y ensayo. El plan de calidad indica los responsables en cada uno de los procesos y los registros de no conformidades como los de resultados de ensayo de los procesos y productos que permiten generar acciones correctivas y preventivas en el sistema.

En el contexto de una organización productora de hormigón elaborado, la producción de hormigones con agregados gruesos reciclado, dentro de un sistema de gestión de la calidad tal como el propuesto en la norma IRAM 30100, requiere de la incorporación de procesos específicos en las etapas de: selección, evaluación de proveedores y recepción de materiales. Estos procesos no generan modificaciones sustanciales en el sistema de producción esencial

Propiedades	Unidad	Método de ensayo	Requisitos
Densidad relativa del agregado seco	g/g	IRAM 1533	= 2200
Absorción de agua	%	IRAM 1533	= 7
Contenido de material no pétreo	g/100g	No normalizado	= 5
Contenido de yeso	% en volumen	JASS 5.16 (KASAI)	= 6
Terrones de arcilla y partículas friables	% en volumen	JASS 5.16 (KASAI)	= 5
Contenido Asfalto	% en volumen	JASS 5.16 (KASAI)	= 1
Pintura sintética	% en volumen	JASS 5.16 (KASAI)	= 2
Polvo de hormigón	% en volumen	JASS 5.16 (KASAI)	= 20

Tabla 3.17: Requisitos particulares para el agregado grueso reciclado.

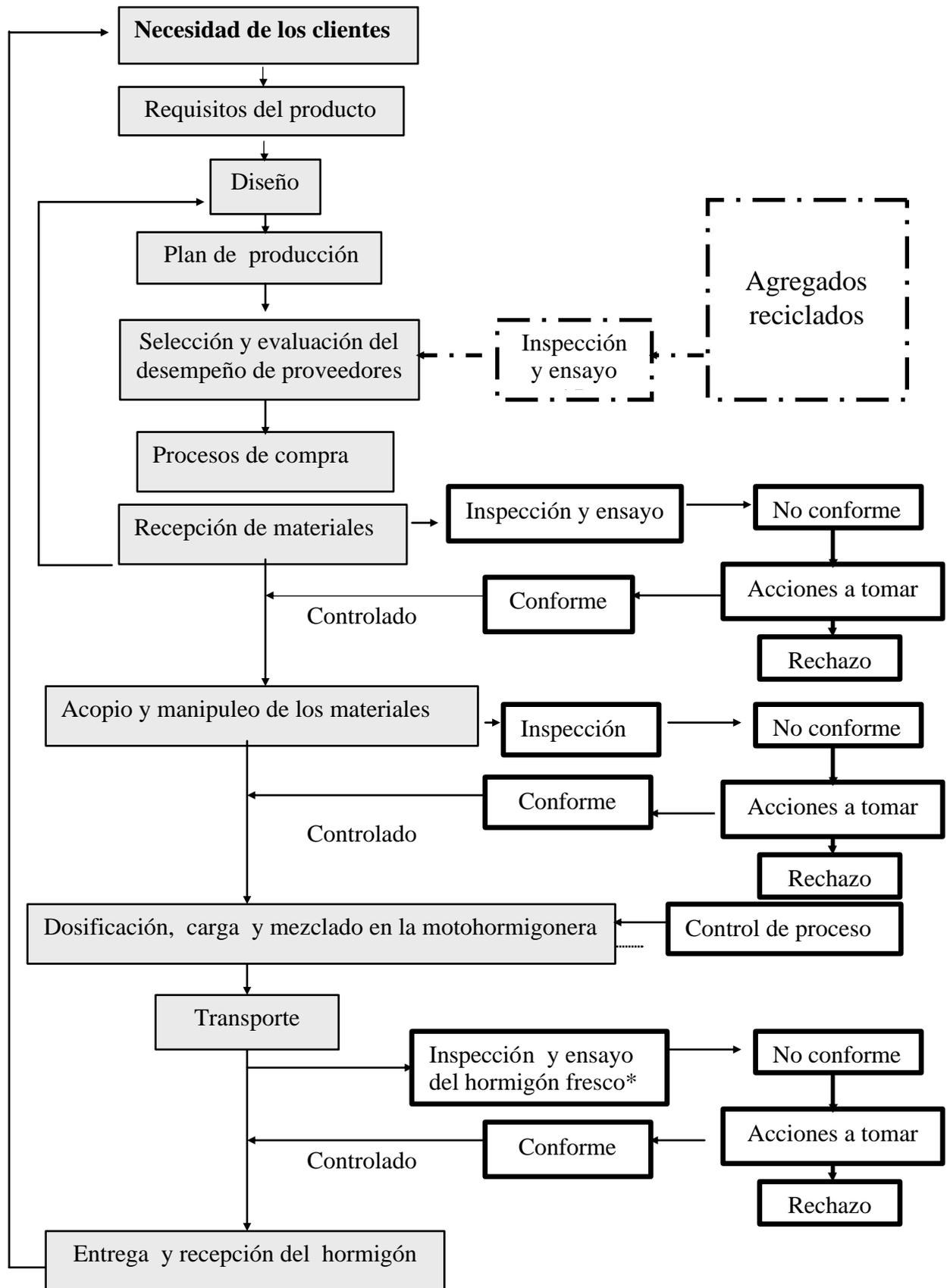


Figura 3.12: Flujograma del proceso esencial de producción.
 (* Se elaboran muestras para evaluar propiedades del hormigón endurecido)

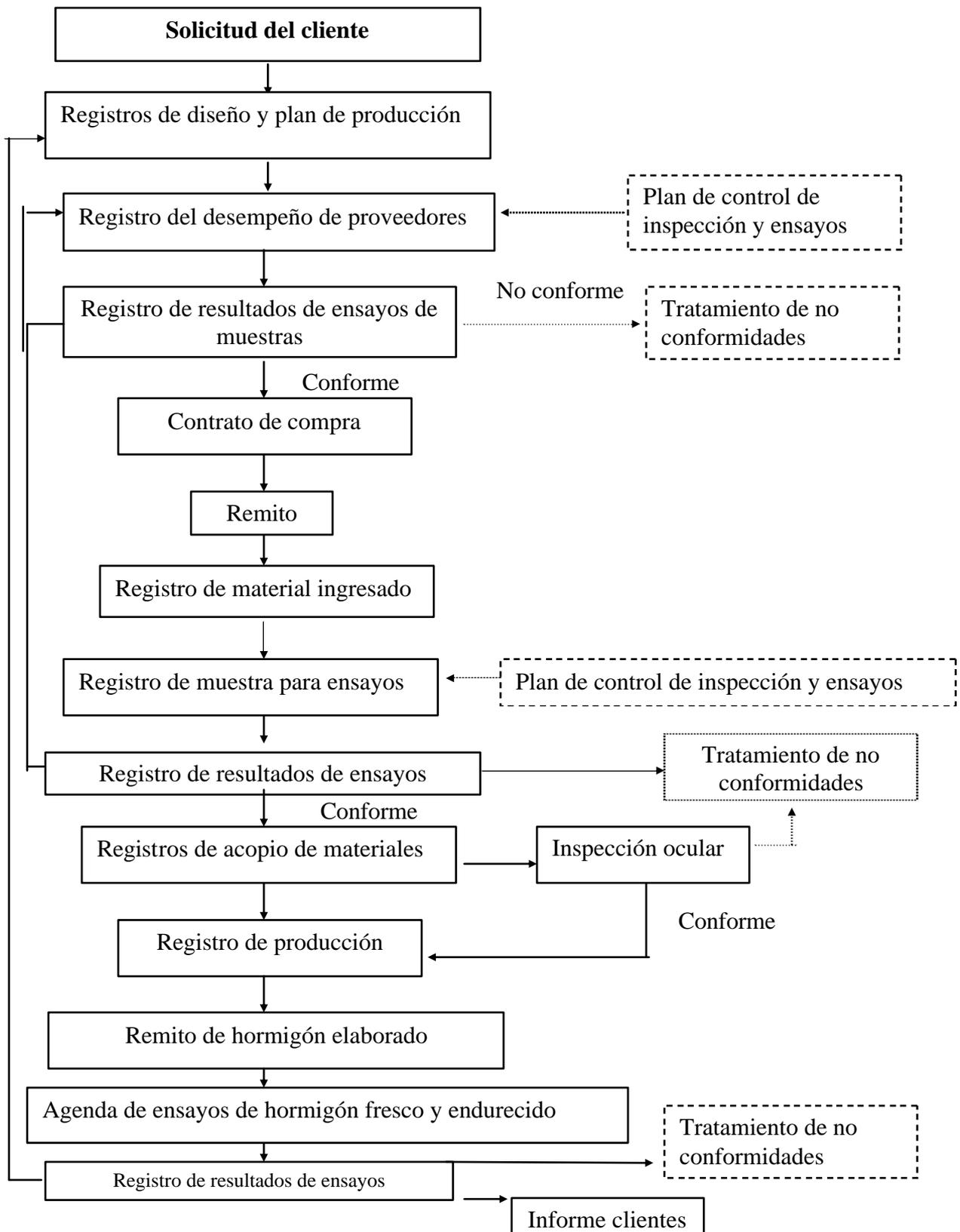


Figura 3.13: Flujograma de la documentación asociada al proceso esencial de producción.

Producción de hormigones con agregados reciclados en laboratorio

Para evaluar las propiedades de los hormigones con agregados reciclados en este trabajo se realiza primero en laboratorio tres pastones por cada tipo de AGREGADO reciclado, así se obtiene:

- Con el agregado natural 1, **AN1**, se elabora el hormigón **HAN1** que al triturarse se obtiene el agregado reciclado 1 **AR1** y con éste se realiza el hormigón **HAR1**.
- Con el agregado natural 2, **AN2**, se elabora el hormigón **HAN2** que al triturarse se obtiene el agregado reciclado 2, **AR2** y con éste se realiza el hormigón **HAR2**.
- Con el agregado natural 3, **AN3**, se elabora el hormigón **HAN3** que al triturarse se obtiene el agregado reciclado 3 **AR3** y con éste se realiza el hormigón **HAR3**.
- Con el agregado natural 4, **AN4**, se elabora el hormigón **HAN4** que al triturarse se obtiene el agregado reciclado 4, **AR4** y con éste se realiza el hormigón **HAR4**.

El método de dosificación que se utiliza en este trabajo es racional en peso. La proporción entre agregado grueso y fino se puede determinar para cada combinación de agregado grueso reciclado y arena de tal forma de ajustarlo a una curva ideal, en este caso se tomo un valor igual para todas las mezclas, con el objeto de establecer comparaciones, además se adopta: relación agua/cemento, relación agregado grueso/agregado fino, asentamiento, cemento Pórtland normal CP40 de procedencia Córdoba, tipo y procedencia de la arena, forma de mezclado y curado igual para los hormigones con agregados reciclados y para los hormigones originales. En ninguno de los hormigones realizados se utilizaron aditivos

Las características de la arena se determinan en función de lo establecido en la norma IRAM 1512 “Agregado fino natural para hormigones de cemento Pórtland”¹⁸. Los resultados se muestran en la tabla 3.18 y la granulometría en la figura 3. 14.

En el momento de realizar los pastones, los agregado reciclados están con una % de humedad superior al % de absorción. Para el mezclado se utiliza una hormigonera de eje basculante, la compactación de las probetas se realiza con un vibrador de inmersión y el curado se materializa en pileta de acuerdo a lo establecido en la norma IRAM 1524¹⁹.

La dosificación y los resultados de ensayos de los hormigones originales, con Agregados naturales y la de los hormigones con agregados reciclados y la relación entre ellos se muestran en las tablas 3.19, 3.20 y 3.21 respectivamente.

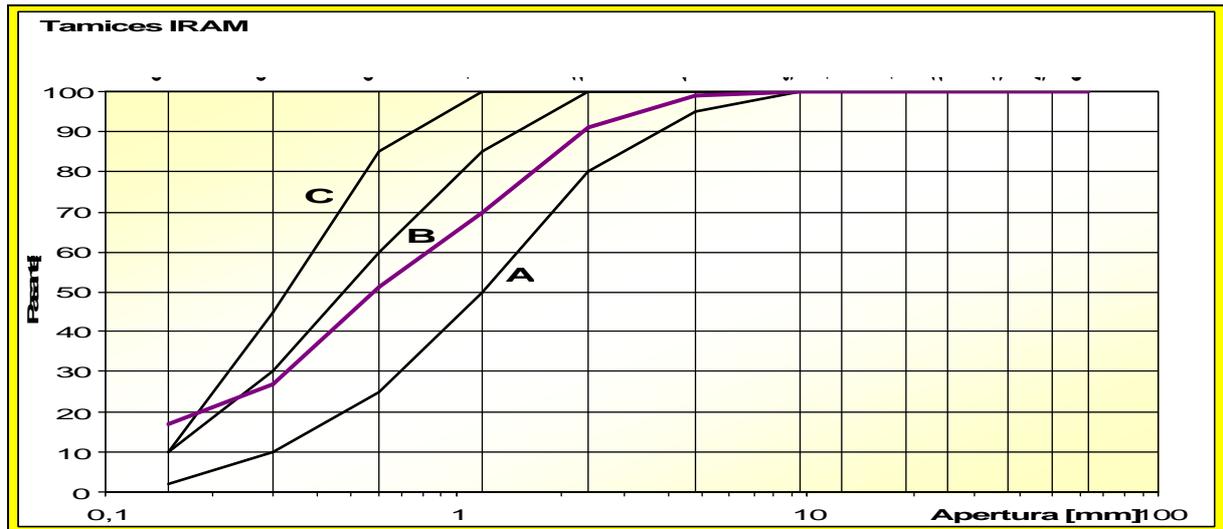


Figura 3.14: Granulometría del agregado fino, curvas límites IRAM 1627

De los resultados de ensayo se observa:

- Mayor demanda de agua en los hormigones con agregados reciclados, en un porcentaje que se encuentra entre un 3 y 6%, como se muestra en la tabla 3.21, para lograr igual asentamiento que los hormigones con agregados original. Esto se puede atribuir a que los agregados reciclados presentan material más fino para igual tamaño máximo y a que las partículas tienen más superficie.
- Al demandar más agua los hormigones con agregados reciclados, demandan más cemento para mantener la relación agua/cemento.
- Las mezclas con agregados reciclados no presentaron segregación.
- La resistencia a compresión simple fue menor en los hormigones con agregados reciclados que en los hormigones originales para igual relación agua cemento. Los valores que se obtienen están entre el 66 y el 82% de la resistencia a compresión simple de los hormigones originales (HAN1, HAN3 Y HAN4 (rango de resistencia entre 27 y 28, 5 Mpa tabla 3.21). Esta disminución probablemente es causada por posibles fisuras que presenta el agregado reciclado por el proceso demolición y por la suma de una interfase producida por el mortero original con el mortero nuevo.
- A igual costo de los Agregados reciclados y de los Agregados naturales, los hormigones con agregados reciclados resultan más costosos ya que para igual relación agua/cemento, demandan más cemento y tienen menor resistencia.

3.4.3. Subsistema obras de hormigón

La estrategia que se propone para este sector consiste en:

- Plantear el proceso de demolición de tal forma de poder recuperar la máxima cantidad de Agregados con el mínimo costo y consumo energético.
- Durante el proceso de demolición en lo posible generar desechos de tamaño tal que permitan ser ingresados en la trituradora primaria.
- Favorecer económicamente, a través de la disminución de impuestos, tasas, etc., a las empresas que depositen los desechos de hormigón en las plantas productoras de Agregados reciclados.
- Incorporar un valor agregado a las obras y las empresas que utilizan hormigones con agregados reciclados a través de campañas publicitarias.
- Destacar las obras que se construyan HAR identificándolas con una imagen en la cual se muestre un símbolo que represente la utilización de material reciclado para otorgarle valor agregado a la obra.
- Brindar a los actores de este sector cursos, seminarios y diversas modalidades de difusión de la tecnología de los Agregados reciclados y los hormigones con Agregados reciclados.

Denominación: Agregado fino natural				
Identificación: AF				
Procedencia: Riío Suquia - Córdoba				
Requisitos IRAM 1512 "AGREGADOS FINO PARA HORMIGONES DE CEMENTO PORTLAND"				
Requisitos	Unidad	Muestra	Máximo	Método
Terrones de arcilla y partículas friables	g/100g	No presenta	3	IRAM 1647
Material que pasa a través el tamiz 75 micrones. (para hormigones sujetos a desgaste superficial)	g/100g	0.25	3	IRAM 1540
Sulfatos expresados como SO ₃	g/100g	0.05	0.1	IRAM 1647
Otras sales solubles	g/100g	0.01	1.5	IRAM 1647
Durabilidad por ataque con sulfato de sodio	g/100g	1.5	10	IRAM 1525
Materia orgánica	mg/Kg	Menor a 500	500	IRAM 1647
Examen petrográfico	No reactivo			IRAM 1649
OTROS ENSAYOS				
Propiedad	Unidad	Valor muestra	Método	
Densidad relativa del agregado en condición s.s.s.		2.62	IRAM 1520	
Absorción	%	0.6	IRAM 1520	

Tabla 3.18: Agregado fino.

Parámetros		Unidades	Tipo de hormigón original			
			HAN1	HAN2	HAN3	HAN4
Dosificación	Cemento	kg/m ³	359	Desechos de planta hormigonera	366	335
	Agua	kg/m ³	201		205	188
	Agregado grueso	kg/m ³	960		976	981
	Agregado fino	kg/m ³	883		898	902
	Agua/cemento		0,56		0,56	0,56
	Agregado grueso/ Agregado fino		1,09		1,09	1,09
Asentamiento*		cm	6		6,2	5,8
Resistencia a la compresión**		Mpa	27,1	28,1	27,8	

Tabla 3.19: Hormigones originales.

Parámetros		Unidades	Tipo de hormigón con agregado reciclado			
			HAR1	HAR2	HAR3	HAR4
Dosificación	Cemento	kg/m ³	371	361	376	354
	Agua	kg/m ³	208	203	211	197
	Agregado grueso	kg/m ³	909	899	923	925
	Agregado fino	kg/m ³	834	828	847	849
	Agua/cemento		0,56	0,56	0,56	0,56
	Agregado grueso/ Agregado fino		1,09	1,08	1,09	1,09
Asentamiento*		cm	6	5,5	6,3	5,8
Resistencia a la compresión**		Mpa	18	19.2	23.4	22.4

Tabla 3.20: Hormigones con agregados reciclados.

** Valor promedio de tres pastones, procedimiento utilizado según IRAM 1536²⁰

*** Procedimiento utilizado según IRAM 1546²¹

Parámetro relacionados	HAR1/HAN1	HAR3/HAN3	HR4/HAN4
Demanda de agua para lograr similar asentamiento (%)	103	103	105
Resistencia a compresión simple (%)	66	83	80

Tabla 3.21: Relación entre hormigones originales y hormigones con agregados reciclados



Foto: 3.1: Agregado reciclado 3 sin tamizar.



Figura: 3.2: Agregado reciclado 3, retenido en el tamiz 4,75 mm.

3.5. Referencias

- ¹ Medina Vásquez J. y Ortegón E. (2006) “Manual de prospectiva y decisión estratégica: bases teóricas e instrumentos para América latina y el Caribe”. CEPAL, Publicaciones de las Naciones Unidas, Chile.
- ² http://www.mecon.gov.ar/analisis_economico/nro4/capítulo3.pdf
- ³ <http://www.indec.gov.ar>
- ⁴ <http://www.afcp.org.ar>
- ⁵ Ley N 7343 (1985) “Principios rectores para la preservación, conservación, defensa y mejoramiento del ambiente 2”, Gobierno de la Provincia de Córdoba. Argentina.
- ⁶ Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, (1986) “Norma IRAM 1666, Hormigón de cemento Pórtland, hormigón elaborado”. Argentina
- ⁷ Cembureau (2001), [http:// www.cembureau.be](http://www.cembureau.be)
- ⁸ Phylipsen D. *et al.* (2002), “Assessing the environmental potential of clean material technologies” Institute for prospective technological studies. España.
- ⁹ Buchinger Eva *et al.*(2000) “The impact of EU regulation on innovation of European Industry “ European Science and Technology Observatory EUR 19623 Project Report By Sponsor F. Leone DG JRC-IPTS *Editor* C. Greaves CEST (UK)
- ¹⁰ Lagos J. *et al.*(2007) “De la reactivación al crecimiento sostenido. la construcción como herramienta del crecimiento continuado” Cámara Argentina de la Construcción 54º Aniversario.
[http://camarco.org.ar/blog/wp-content/uploads/2007/01/Disertacion-\(03\)%20Lic.%20Clarisa%20ESTOL.pdf](http://camarco.org.ar/blog/wp-content/uploads/2007/01/Disertacion-(03)%20Lic.%20Clarisa%20ESTOL.pdf)
- ¹¹ Hansen, T. C. (1992) “Recycled of demolished concrete and masonry”, Rilem Report of Tecnical Committe 37- DRC Demolition and reuse of concrete Edited by T.C.Hansen , USA
- ¹² Gómez Soberón J.M.V. *et al* (2001) “Hormigón con Agregados reciclados una guía de diseño para el material” CIMNE España.
- ¹³ Kasai Y.(1993)“Guidelines and the present state of the ruse of demolished concrete in Japan”. Demolition and reuse of concrete and masonry, Rilem proceedings 23, Lauritzen. Londres.
- ¹⁴ Instituto Argentino de Racionalización de Materiales. (1994) “Norma IRAM 1531 Agregado grueso para hormigones de cemento Pórtland”. Argentina.

-
- ¹⁵ Zerbino R. *et al.* (2006) “Empleo de hormigones reciclados para la construcción de losas de pavimentos urbanos”, 16ª Reunión técnica, Prof. Agrim. Antonio Bonforte, Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón. Argentina.
- ¹⁶ Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, (2000) “Norma Argentina IRAM 30100, Guía de interpretación de la IRAM-ISO 9001:2000 en la construcción”. Argentina
- ¹⁷ Durán G. *et al.* (2005). “Elaboración de hormigones con agregados gruesos reciclados en el marco de la norma IRAM 30100, guía de interpretación de la IRAM-ISO 9001:2000 en la construcción”, COMPAT 2005, VIII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y X congreso de Control de calidad en la Construcción, Paraguay.
- ¹⁸ Instituto Argentino de Racionalización de Materiales. (1994) “IRAM 1512:1994, Agregado fino natural para hormigón de cemento Pórtland”. Argentina.
- ¹⁹ Instituto Argentino de Racionalización de Materiales. (2004), “IRAM 1524:2004, Preparación y curado en obra de probetas para ensayos de compresión y de tracción por compresión diametral”. Argentina
- ²⁰ Instituto Argentino de Racionalización de Materiales. (1985). “*IRAM 1534:1985, Método de ensayo de la consistencia utilizando el tronco de cono*” Argentina.
- ²¹ Instituto Argentino de Racionalización de Materiales (1992). “Norma IRAM 1546: 1992, Hormigones de cemento Pórtland, Método de ensayo a compresión”. Argentina.

Capítulo 4

Modelo

4.1. Introducción

En el presente capítulo se propone un modelo que mediante la simulación de diversos escenarios permita analizar las acciones planteadas en el capítulo tres para la difusión de los HAR. Para materializar el modelo se utiliza la dinámica de sistemas y el programa de simulación STELLA. Además, con el objeto de validar el modelo se simulan dos periodos históricos; uno comprendido entre los años 1999 y 2002 de recesión económica y otro de crecimiento económico comprendido entre los años 2002 y 2007.

4.2. Modelo de difusión de los hormigones con agregados reciclados

El modelo pretende simular factores productivos, económicos y sociales relevantes para la difusión de los hormigones con agregados reciclados y la generación de los desechos de hormigones producto de las demoliciones y de los desperdicios de la producción. El mismo se estructura considerando los tres subsistemas del sistema delimitado en el capítulo tres y se desarrollan a continuación

4.2.1. Subsistema desarrollo y adopción

Compuesto por las variables:

- **Coficiente de capacidad productiva [CCP]:** Es una variable de estado, que se desarrolla como parte de esta investigación e indica la capacidad de

producir agregados, hormigones o demoler. Representa la capacidad productiva en la unidad de tiempo acumulada en relación a la capacidad productiva en la unidad de tiempo de un tiempo que se toma como referencia o patrón. La definición de capacidad productiva adoptada en este trabajo se basa en la propuesta por la UNCTAD¹, Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo, por lo que se entiende como capacidad productiva al conjunto de recursos productivos [equipamiento, recursos humanos, etc.], capacidades empresariales y vinculaciones en la producción que unidos, determinan la capacidad para producir. En el modelo se asumen que esta variable incide de igual forma en las industrias de: agregados hormigón y demolición. El coeficiente de capacidad productiva depende de la demanda. La unidad de medida es [Unidad de producción/tiempo/unidad de producción/tiempo], que para el caso de la producción de agregados la unidad puede ser [Tn/día/Tn/día] y para el caso del hormigón es [m³/día/m³/día]. Para analizar la evolución a partir de un tiempo determinado se puede asignar un valor de cero al tiempo inicial. La expresión matemática aplicada es: coeficiente de capacidad productiva en un tiempo [t] igual a la coeficiente de capacidad productiva en el tiempo [t -dt] más la demanda por dt.

$$CCP[t]= CCP [t - dt] + Demanda * [dt] \quad (4.1)$$

- **Demanda [Demanda]:** Este indicador también se desarrolla en el marco de esta investigación y representa la variación de la demanda de agregados, hormigón y demolición. Es una variable de flujo que incide en la variación del coeficiente de capacidad productiva de la industria de los agregados, hormigón y demolición en la unidad de tiempo. La capacidad productiva crece cuando crece la demanda de obras de hormigón. En función de los análisis la evolución de la demanda de la capacidad productiva de la construcción se supone con un comportamiento análogo al de la industria de la construcción y por consiguiente al del PBI. Es decir que si el PBI crece, la demanda de la producción de agregado y de hormigón crecen, se realizan inversiones en el sector, aumenta la capacidad productiva y por consiguiente el CCP. Pero si el PBI decrece, disminuye la demanda y la capacidad productiva (hay despido de personal, cierre de fábricas, etc.); en consecuencia disminuye el coeficiente de capacidad productiva.

En el modelo se puede observar que la demanda se alimenta de una “nube” que indica el límite del modelo y que el flujo es bidireccional, lo que se interpreta considerando que el coeficiente de capacidad productiva puede crecer o decrecer. La unidad es: [[unidad de producción/tiempo/unidad de producción/tiempo]/tiempo]

$$Demanda =d[CCP]/dt \quad (4.2)$$

- **Aceptación [A].** Es una variable de estado ideada en el marco de este trabajo, que representa la cantidad de usuarios e instrumentos normativos que contemplan a los agregados reciclados y a los hormigones con agregados reciclados. La ecuación indica que la aceptación en un tiempo [t] es igual a la aceptación en el tiempo [t -dt] más la adopción en un dt.

$$A[t]= A[t - dt] + Ad*[dt] \quad (4.3)$$

- **Adopción [Ad]:** Es una variable de flujo, también ideada para este trabajo que representa la cantidad de usuarios que utilizan instrumentos regulativos (normas, especificaciones técnicas, etc.) que contemplan la aplicación de los agregados reciclados y de los hormigones con agregados reciclados; es decir, que adoptan la nueva tecnología, sobre la cantidad de potenciales usuarios e instrumentos regulativos de la nueva tecnología en la unidad de tiempo. La unidad utilizada es aceptación sobre tiempo. Esta variable incorpora en el modelo la evolución de la aceptación social, que se refleja no sólo en la producción sino también en los instrumentos regulatorios que favorecen dicha aceptación, tales como normas, pliegos de especificaciones técnicas, etc. Al incrementarse la adopción, se incrementa la producción de agregados reciclados y la de los hormigones con agregados reciclados; de igual forma, si la adopción disminuye, decrece la producción de agregados reciclados y la de los hormigones con agregados reciclados. La adopción en el modelo se alimenta de una “nube” que indica otro límite del modelo. Esta variable tiene un valor mínimo igual a cero que representa una tecnología que no se utiliza ni es contemplada por ningún instrumento regulador y tiene un valor máximo de uno cuando todos los posibles usuarios e instrumento regulatorios la adoptan y la contemplan.

La representación gráfica de la adopción en función del tiempo puede tener diferentes formas: a título de ejemplo y en el contexto de esta tesis, en un escenario optimista podría responder a una recta con una gran pendiente o a una curva con forma de “S” como se analizó en el capítulo dos, típica de la evolución de tecnologías exitosas. Para un escenario pesimista, la representación gráfica podría ser una recta horizontal coincidente con el eje de las x o una recta con pendiente negativa para tecnologías obsoletas. La expresión de esta variable es:

$$Ad = d[Ad]/dt \quad (4.4)$$

4.2.2. Subsistema Productor

A los fines ilustrativos del modelo se muestran por separado la producción de agregado natural de la de los agregados reciclados, al igual que la de los hormigones con agregados naturales de la de los hormigones con agregados reciclados, pero tanto los productores de agregados naturales como los productores de hormigón con agregados naturales son los actores relevantes para la incorporación de la tecnología del reciclado tal como se explicitara en el capítulo cuatro. En el modelo no se representan los otros materiales componentes del hormigón [cemento, aditivos, etc.] ya que no influyen para el propósito de este trabajo.

En este subsistema se encuentran las siguientes constantes:

- **Capacidad de producción inicial agregado grueso [CPIA]:** Es la cantidad de masa de agregado por unidad de tiempo que se produce en el tiempo inicial del análisis o de referencia. La unidad de medida es masa/tiempo.
- **Capacidad de producción inicial hormigón [CPIH]:** Es la cantidad de volumen de hormigón por unidad de tiempo que se produce en el tiempo inicial del análisis o de referencia. La unidad de medida es volumen/tiempo.

Variables del subsistema:

- **Acopio de agregado grueso natural [Acopio AN]:** Variable de estado que representa la cantidad de agregado natural (AN) medido en unidad de masa que cumple con los requisitos para ser utilizado como componente del hormigón. El acopio de AN es el resultado de la cantidad de agregado natural producido (Producc AN), menos la cantidad de agregado natural consumido para la producción de hormigón con agregado natural (Producc HAN) La expresión matemática es igual a:

$$\text{Acopio AN}[t] = \text{Acopio AN}[t-dt] + [\text{Producc AN} - \text{producc HAN}] * dt \quad (4.5)$$

- **Producción de agregados grueso naturales [Producc AN]:** Variable de flujo que indica la cantidad de agregado natural que se produce en la unidad de tiempo. Las mediciones se realizan en la unidad masa/tiempo. Esta variable depende de la capacidad de producción inicial por el incremento del coeficiente de capacidad productiva menos la cantidad de agregados reciclados producidos [Producc AR], ya que los productores de agregados naturales en el modelo también son los productores de agregados reciclados. En el modelo la producción de agregados naturales se alimenta de una “nube” que indica un límite del modelo y además significa que para el alcance temporal del presente estudio, las canteras no representan una restricción o limitación para la producción. La expresión es:

$$\text{Producc AN} = \text{CPIA} * [1 + \text{CCP}] - \text{Producc AR} \quad (4.6)$$

- **Producción de hormigones con agregados grueso naturales [Producc HAN]:** Variable de flujo que indica el volumen de hormigón con agregado natural que se produce en la unidad de tiempo. Esta variable depende de la capacidad de producción instalada por el incremento del coeficiente de la capacidad productiva menos la cantidad de hormigón con agregados reciclado producido (Producc HAR), ya que los productores de hormigón con agregados naturales utilizan la misma infraestructura para producir hormigones con agregados reciclados. Tal como se muestra en el modelo, la producción de HAN está condicionada a la cantidad de AN acopiado. En la figura del modelo la producción de HAN se muestra en dos colores lo que indica un cambio de unidades en el flujo, ingresa masa de agregado natural [AN] y egresa volumen de hormigón, como sucede en las plantas

productoras reales [dosificación de los agregados en masa y comercialización del hormigón en volumen]. La expresión es:

$$\text{Producc HAN} = \text{CPIH} * [1 + \text{CCP}] - \text{Producc HAR} \quad (4.7)$$

- **Reemplazo [R]:** Es una variable auxiliar que representa la cantidad de volumen de hormigón que se puede realizar con la unidad de masa de agregado. A título de ejemplo, si la unidad de medida del hormigón es un metro cúbico y la dosificación tipo o patrón es tal que con una tonelada de agregado grueso reciclado se puede producir un metro cúbico de hormigón con agregado reciclado solamente, el valor de “reemplazo” será de 1. Pero si para un metro cúbico de hormigón, se utiliza sólo un 25% de agregado grueso reciclado del total de agregado grueso, implica que con la dosificación patrón con una tonelada de agregado grueso reciclado se puede producir cuatro metros cúbicos de hormigón con agregado reciclado, entonces el valor de “reemplazo” será de 4. Es decir, con una tonelada de agregado reciclado se logran 4 metros cúbicos de hormigón con agregados reciclados. La unidad de medida es [volumen/masa]. Esta variable además permite simular la introducción del hormigón reciclado paulatinamente en el mercado, lo que favorece la confianza y la aceptación del producto por parte de los usuarios. Además, tal como muestran diferentes investigaciones analizadas en el capítulo dos según el porcentaje de reemplazo de agregados reciclados por agregados naturales las propiedades del hormigón no cambian considerablemente.

$$R = \text{Constante} \quad (4.8)$$

- **Desperdicios de la Producción de HAN [DR]:** Es una variable auxiliar que muestra el porcentaje de agregado grueso factible de reciclar proveniente de los desechos de la producción del hormigón con agregados naturales. La unidad de medida es [masa/volumen]. En este modelo se la considera un valor constante.

$$DR = \text{Constante} \quad (4.9)$$

- **Producción configurada de agregados grueso reciclados [Producc CAR]:** Es una variable de flujo. Representa la cantidad de volumen de agregado reciclado capaz de producirse en la unidad de tiempo para obtener la unidad de volumen de hormigón con agregados reciclados. Esta variable se alimenta de una nube que representa los escombros de hormigón existente antes del periodo simulado. Depende de los desperdicios provenientes de la producción de hormigón con agregado natural, de las obras de hormigón fuera de servicio a demoler, de la adopción y del reemplazo de agregado grueso natural por agregado grueso reciclado para producir la unidad de volumen de hormigón con agregados reciclados. La expresión utilizada es:

$$\text{Producc CAR} = [\text{Producc HAN} * DR + DE] * Ad * R \quad (4.10)$$

- **Acopio configurado de agregado grueso reciclado [ACAR]:** Variable de estado desarrollada en el contexto de esta tesis que representa la cantidad de unidades de volumen de hormigón con agregados reciclados capaz de producirse con la unidad de masa de agregado grueso reciclado. El acopio configurado es función de la producción configurada de agregado grueso reciclado CAR más el agregado grueso reciclado proveniente de la demolición y de la producción de hormigón con agregado grueso reciclado. La expresión es:

$$ACAR [t] = ACAR[t-dt] + [Producc CAR+Reciclar- Producc HAR]*dt \quad (4.11)$$

- **Producción de hormigones con agregados grueso reciclado [Producción HAR]:** Variable de flujo que indica el volumen de hormigón con agregado grueso reciclado que se produce en la unidad de tiempo. Depende de la cantidad de agregado grueso reciclado disponible y del valor de reemplazo de agregado grueso reciclado establecido, que se ilustra en el modelo como el acopio configurado de agregado grueso reciclado y de la adopción. La ecuación es:

$$Producc HAR = d[ACAR *Ad]/dt \quad (4.12)$$

4.2.3. Subsistema Obras de hormigón

- **Obras de hormigón con agregado grueso natural [Obras HAN]:** Variable de estado que muestra la cantidad en volumen de hormigón producido con agregado grueso natural acumulados que se encuentra en obras de hormigón. Está condicionada por la producción de HAN y por las obras fuera de servicio demolidas. La expresión que se aplica es:

$$Obras HAN [t] = Obras HAN [t-dt] + [Producc HAN - DE]*dt \quad (4.13)$$

- **Obras de hormigón con agregado grueso reciclado [Obras HAR]:** Variable de estado que muestra la cantidad en volumen de hormigón producido con agregado grueso reciclado acumulado que se encuentra en obras de hormigón con agregados reciclados y depende de la producción de HAR. En el modelo no se contempla la posibilidad de que las mismas generen desechos ni sean factible de demoler por el alcance temporal del mismo.

$$Obras HAR [t] = Obras HAR [t-dt] + [Producc HAR]*dt \quad (4.14)$$

- **Demolición de obras de hormigón [DE]** Es una variable de flujo que indica la cantidad de masa de agregado factible de reciclar proveniente de las obras de hormigón con agregados naturales fuera de servicio demolidos. La demolición es una industria del área de la construcción y como todas depende de la capacidad productiva. En el modelo la simbología se muestra en dos colores porque se produce un cambio de unidades de volumen de hormigón a masa de agregados. Esta variable depende de la capacidad de demolición de obras de hormigón fuera de

servicio y de la capacidad productiva del sector demolición [empresas de dedicadas a este proceso, mano de obra, etc.]. La expresión utilizada es:

$$Demolición = Demolición\ inicial [1 + CCP] \quad (4.15)$$

- **Desechos de obras de hormigón [Desechos]:** Variable de estado que muestra la cantidad de masa de agregado grueso factible de reciclar producto de la demolición de obras de hormigón fuera de servicio que no se reciclan.

$$Desechos [t] = Desechos [t-dt] + [Demolición-Reciclar]*dt \quad (4.16)$$

- **Reciclar:** Variable de flujo que indica la cantidad de volumen por unidad de tiempo de agregado grueso configurado producto de los desechos.

$$Reciclar = Desechos*Reemplazo \quad (4.17)$$

En la figura 4.1 se muestra el modelo con el lenguaje del programa STELLA. Los recuadros rojos muestran los subsistemas y en ellos las distintas variables. En el subsistema desarrollo y adopción se muestra el flujo bidireccional de la demanda vinculado al coeficiente de capacidad productiva (CCP) (color negro). También se representa en forma bidireccional la adopción de tecnología (color morado), ya que puede crecer su aceptación por ende su adopción o disminuir (ejemplo tecnologías obsoletas, etc.). En el Subsistema productor el flujo de color marrón representa la producción de hormigones con agregados naturales y el flujo de color verde la de los hormigones con agregados reciclado, se observa tanto en la producción de agregados naturales (producc AN) como en la producción de hormigones con agregados naturales (producc HAN) la influencia del coeficiente de capacidad productiva que se muestra a través de conectores en líneas rojas. También se puede observar la incidencia de la adopción en la producción configurada de agregados reciclados y en la de hormigones con agregados reciclados por los conectores en línea roja. En el subsistema obras de hormigón se muestran las obras realizadas con hormigones con agregados naturales y las realizadas con agregados reciclados al igual que la acumulación de desechos, las demoliciones que se vincula con la producción de agregados reciclados y el proceso de reciclado. En la figura 4.2 se muestra el mismo modelo pero a los efectos de ordenar la representación se colocan representaciones virtuales denominadas “fantasmas” del coeficiente de capacidad productiva, reemplazo y de demolición.

Se puede observar en el modelo un bucle de realimentación negativa, ya que si se produce un incremento de la producción de hormigones con agregados reciclados (Producc HAR), genera un decremento de la producción de hormigones con agregados naturales (Producc HAN) que a su vez genera un decremento de la producción de agregados reciclados (Producc de CAR) generando un decremento de la Producc HAR como se observa en la figura 4.3. El bucle de realimentación positiva que se muestra en la figura 4.4 se interpreta considerando que a medida que se producen más agregados reciclados se puede producir más HAR y habrá en consecuencia más usuarios que colaboran en la difusión. También hay otro bucle de realimentación positivo entre la variable de

estado Desechos y el flujo "Reciclar", dado que a medida que hay más desechos es factible reciclar más.

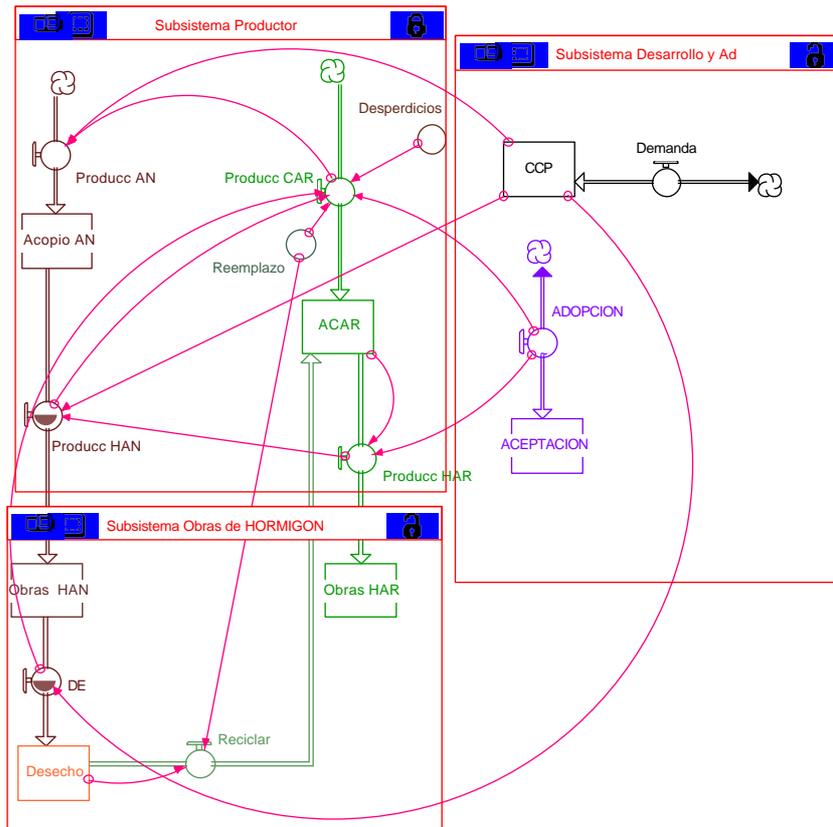


Figura 4.1.: Modelo de difusión de los hormigones con agregados reciclado [Sin fantasmas]

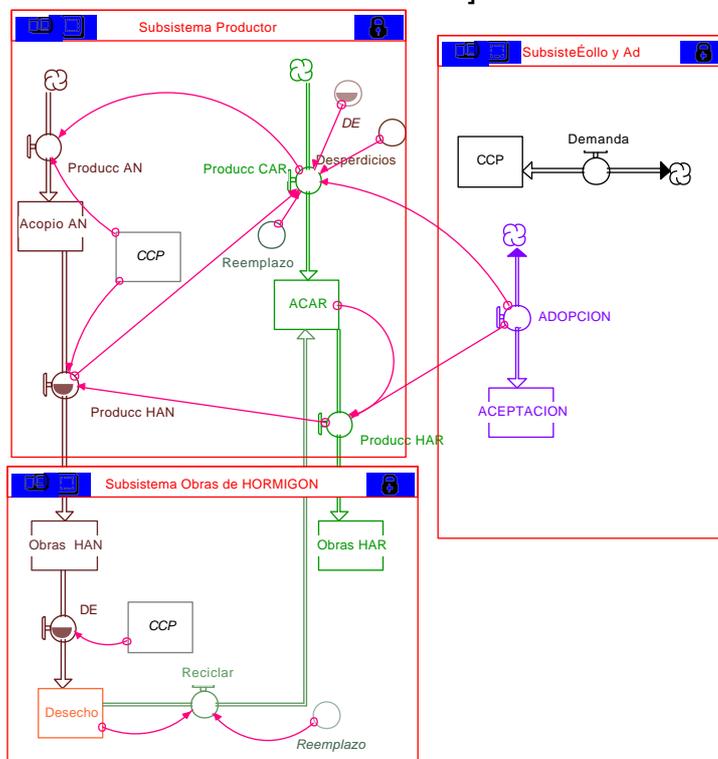


Figura 4.2: Modelo de difusión de los hormigones con agregados reciclados (con fantasma).

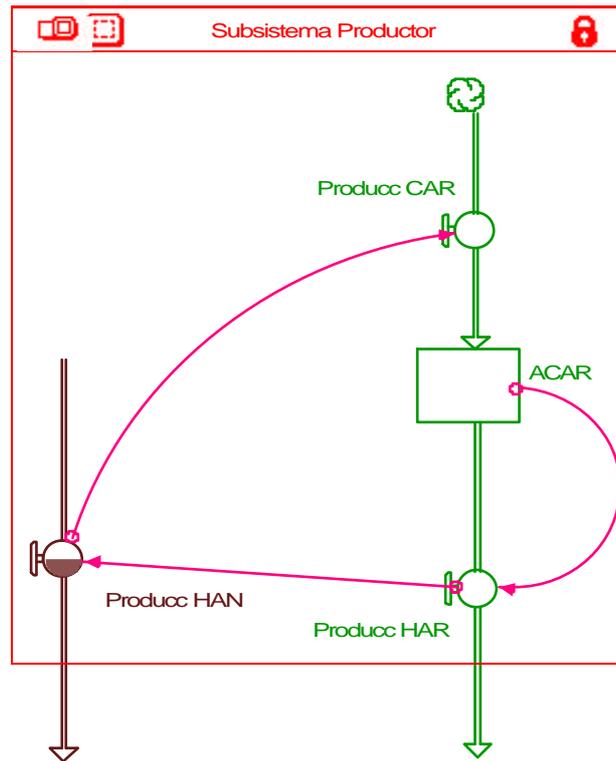


Figura 4.3.: Bucle de realimentación negativa

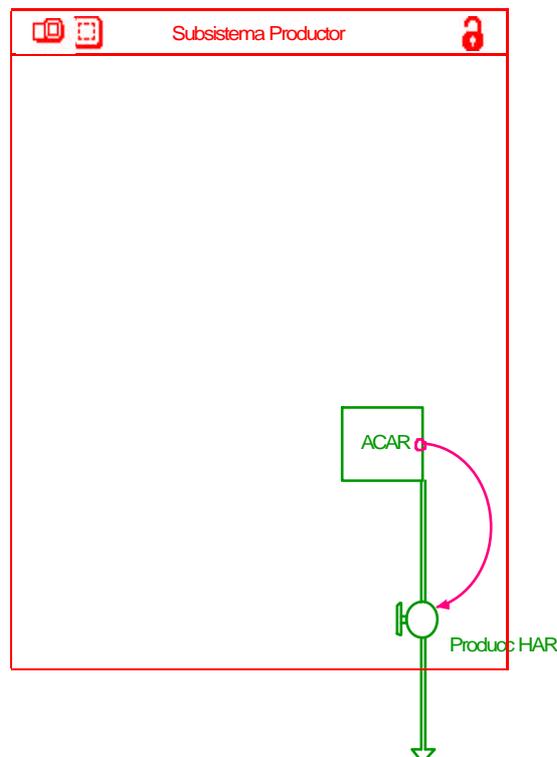


Figura 4.4.: Bucle de realimentación positiva

4.3. Validación del modelo

La validación de modelos que se emplean en la dinámica de sistemas ha sido tema de discusión en la literatura especializada. Para discutir la validación del modelo que se desarrolló en esta tesis, se utiliza el concepto de validación y los criterios definidos por Godoy y Bartó² que se explicitan a continuación:

- “Desde el punto de vista computacional, la validación del sistema es la parte del proceso de construcción de la simulación que asegura que si el sistema ha sido verificado, el conocimiento que contiene representa y simula correctamente el dominio de conocimientos”.
- Criterio de correspondencia entre estructuras: los autores citados señalan: *“Como la dinámica de sistemas parte del concepto que el comportamiento de un sistema está determinado por su estructura, entonces un indicador lícito es asociar la validez con la correspondencia entre estructuras: la estructura que se ha dado al modelo comparada con la estructura del sistema que está siendo modelado. Cada elemento del modelo debe tener su contraparte en el mundo real, y cada factor importante en el sistema real debe estar reflejados en el modelo.”* En el capítulo tres de esta tesis se estableció la correspondencia entre la estructura del sistema para la difusión de los hormigones con agregados normales y la del modelo descrito. Por cierto que ésta no es una validación con carácter de objetividad, dado que la estructura misma del sistema es fijada por el investigador, al igual que la estructura del modelo que se desarrolla.
- Criterio de correspondencia entre comportamientos: los autores indican: *“Si las condiciones iniciales del modelo se ajustan al estado del sistema que se modela en algún tiempo del pasado, entonces el comportamiento del modelo debería replicar los datos históricos entre ese tiempo y el presente”.* Para la aplicación de este criterio se replica la evolución de la producción de hormigón con agregados normales y con agregados reciclados en Córdoba durante dos periodos con comportamiento bien diferenciado; uno de decrecimiento económico comprendido entre los años 1999 y 2002, y otro de crecimiento económico acaecido durante los años 2002 y 2007. Para esto es necesario suponer que la estructura del sistema no se modifica durante los periodos simulados y que en el modelo se representan las variables más relevantes del sistema. En el marco de esta tesis éstos son los dos aspectos que interesan validar ya que el sistema a representar es de naturaleza compleja como toda difusión de tecnología y no se limita a aspectos exclusivamente: técnicos, científicos, económicos, políticos y sociales, sino que el modelo pretende representar con un lenguaje sistémico los aspectos más relevantes: técnicos, científicos, económicos, políticos y sociales y sus relaciones, que hacen a la difusión de los hormigones con agregados reciclados.
Los datos históricos que se disponen son pobres y en muchos casos es necesario realizar una serie de supuestos para paliar la falta de datos por lo que no se pretende validar ningún aspecto cuantificable.
- **Criterio de utilidad:** los autores proponen que *“Dado que se reconoce el carácter no objetivo de los modelos de la DS, surge la cuestión práctica de utilidad como un sustituto de la verdad. Si el modelo fue desarrollado*

para crear escenarios alternativos y tomar decisiones, entonces la utilidad depende de si el modelo logra construir el escenario adecuado, si puede establecerse que el escenario es realista [como opuesto a fantasiosos] y si permite tomar decisiones” Los autores destacan que el aspecto más importante de este aspecto no es “el escenario realista” si no que el modelo permita la toma de decisiones. La validación del modelo en función de este criterio se desarrolla en el capítulo 6.

4.3.1. Simulación del periodo comprendido entre los años 1999 a 2002

4.3.1.1. Consideraciones para el análisis histórico

- a. En función de los datos históricos de consumo de cemento que se muestran en la figura 3.2 y los valores del porcentaje de consumo de cemento en la Provincia de Córdoba en relación a los de todo el país que se disponen y que se muestran en la tabla 4.1, se adopta como porcentaje de consumo de cemento en la Provincia de Córdoba en relación al de todo el país para el periodo a simular [años 1999 a 2002], el valor de 12,45%, que resulta el consumo promedio de los años en los cuales se dispone de datos.
- b. Dado los relevamientos realizados y datos propios, se adoptan las siguientes características del hormigón más vendido en la zona, que se define como hormigón patrón:
 - o Contenido unitario de cemento por metro cúbico de hormigón, igual a 325 kg/m³H.
 - o Densidad de 2400 kg/m³H.
 - o 41% de la masa del hormigón corresponde a masa de agregado grueso.

Año	% de consumo de cemento en la Provincia de Córdoba en relación al consumo total en Argentina
2004	12,62
2005	12,55
2006	12,24
2007	12,41
Promedio	12,45

Tabla 4.1: Relación porcentual entre el consumo de cemento en la Provincia de Córdoba y en Argentina.

- c. En la tabla 3.3 se muestran valores de cemento comercializado durante los años 2005 y 2007 a granel y en bolsa. El valor promedio del cemento comercializado a granel es de 35,6% si se considera que todo este cemento se utilizó para la producción de hormigón elaborado o prefabricado más un leve porcentaje más, se infiere que del total del cemento producido, un 40% se utilizó para la producción de hormigón en forma industrial.
- d. Los relevamientos realizados mostrados en las tablas 3.1, 3.4, y 3.5 y datos propios indican que durante el periodo 1999 y 2007 no se realizaron hormigones con agregados reciclados a escala industrial, y hubo muy pocos instrumentos regulatorios que contemplaran su utilización. Mayoritariamente se recurrió a la producción con agregados naturales y en poca cantidad a agregados livianos, tales como poliestireno expandido. En la simulación se supone que para la producción de hormigón se utilizaron únicamente agregados naturales
- e. Se considera que el despacho de cemento anual informado por la Asociación Argentina de Fabricantes de Cementos es de consumo interno.
- f. En la tabla 4.2 se muestran los valores de producción de hormigón con agregados naturales que conforman las obras de hormigón con agregados naturales [HAN], obtenidos en función de los datos históricos de despacho de cemento publicados por la Asociación Argentina de Fabricantes de Cemento y de los supuestos anteriormente descriptos. Además en la figura 4.5. se muestran los metros cúbicos de producción de hormigón en la provincia de Córdoba en los años 1999, 2000, 2001 y 2002 y los valores acumulados.

Año	Días	Obras de HAN [m³ de hormigón acumulados] [VDH]
1999	0	1.092.397,9
2000	360	2.019.198,5
2001	720	2.831.290,9
2002	1080	3.430.637,7

Tabla 4.2.: Volumen acumulado de obras de hormigón con agregados naturales realizadas en Córdoba durante los años 1999 y 2002.

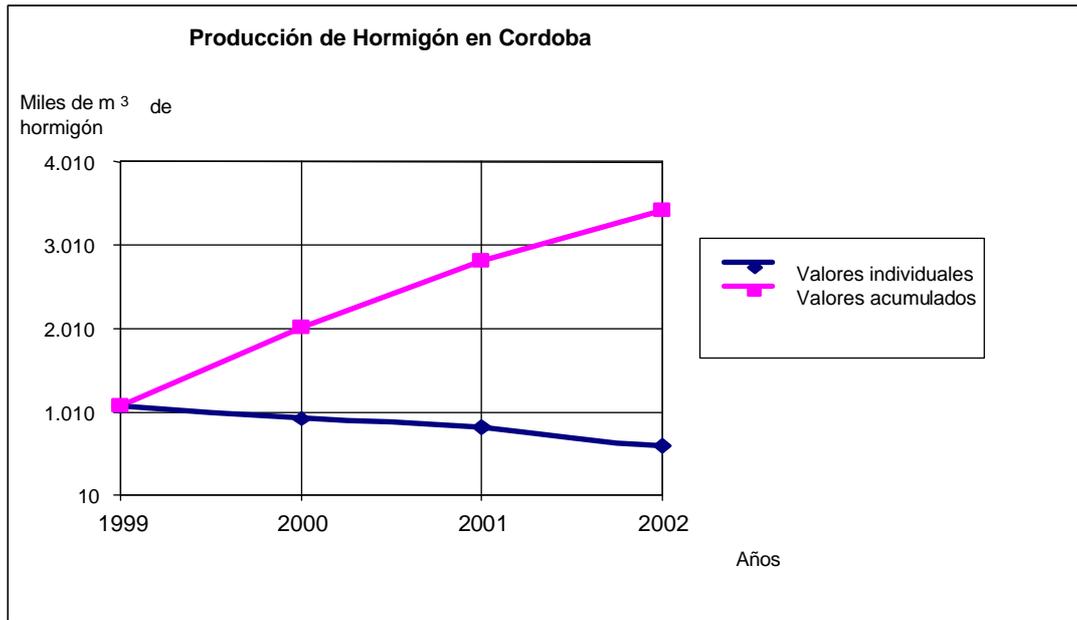


Figura 4.5.: Volumen individual y acumulado de producción de hormigón con agregados naturales realizadas en Córdoba durante los años 1999 y 2002.

4.3.1.2. Consideraciones para las variables del modelo

4.3.1.2.1. Subsistema desarrollo y adopción

- a. Se toma como año de referencia el año 1999, por tal razón el valor de “**coeficiente de capacidad productiva**” para ese año es igual a cero.
- b. En la figura 3.1 se muestra la evolución del PBI desde el año 1993 hasta la fecha y en la figura 4.6. se modela la variación del PBI en el periodo de análisis con una expresión lineal cuya pendiente es -14,18. Se analizó anteriormente que la industria de la construcción evoluciona en forma análoga al PBI y en consecuencia a la industria del hormigón, de los agregados y de demolición. Entonces para realizar la simulación se adopta que la demanda de hormigón y agregado evoluciona en forma análoga al PBI, lo que se refleja en la capacidad productiva. Dado que la unidad de tiempo del modelo es el día, el valor de “**Demanda**” utilizado para la simulación es igual a -14,18 dividido 100 dividido 360, obteniendo un valor de variación de demanda diaria igual a - 0.00039.
- c. Por las consideraciones realizadas anteriormente los valores iniciales de “**adopción**” y “**aceptación**” de los hormigones con agregados reciclados en este periodo son iguales a cero.

4.3.1.2.2. Subsistema Productor

- a. La capacidad inicial de **producción de agregados gruesos naturales [Producc AN]** se determina considerando que el 41% de la masa del hormigón patrón está compuesta por agregado grueso y que la producción

de agregados naturales por día es igual a la demanda. Los registros y cálculos realizados de la producción de hormigón durante 1999, (que se considera igual a la demanda, ya que el hormigón a diferencia de otros productos industriales no se puede guardar formando stock), fue de 1.092.397,5 metros cúbicos de hormigón al año, es decir 1.074.919 toneladas de agregado grueso al año, equivalente a una producción diaria de 2986 toneladas/días.

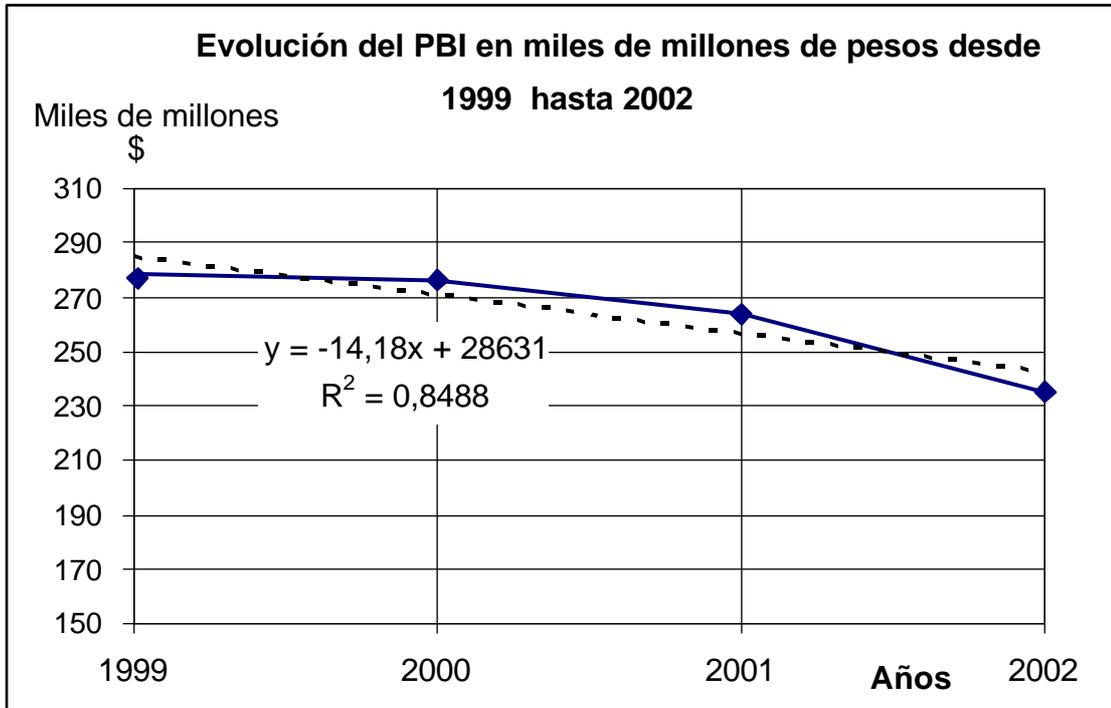


Figura 4.6: Modelación lineal del PBI entre los años 1999 y 2002. Fuente INDEC

- b. A los efectos de que el **acopio de agregado grueso natural [Acopio AN]** no incida en la producción de hormigones con agregados naturales el valor inicial es equivalente a 1000 días de producción, es decir 2.986.000 toneladas.
- c. La capacidad inicial de **producción de hormigón con agregados grueso naturales [Producc HAN]** adoptada es igual a la producción promedio diaria de hormigón durante el año 1999 que resulta equivalente a una producción de 2986 metros cúbicos de hormigón por día.
- d. Los **desperdicios** de la producción de hormigones con agregados naturales se determinan en función del análisis de antecedentes expuestos en los capítulos anteriores, adoptando un desperdicio igual al 2% del volumen de hormigón producido, densidad del hormigón patrón de 2,4 Tn, 41% de masa de agregado en la masa de un metro cúbico de hormigón y la factibilidad de recuperar 0,80 % de los agregados, en consecuencia el valor de desperdicio de agregado grueso. En relación al metro cúbico de hormigón es para el modelo es 0.015744 [Tn/m³H].

- e. **Producción configurada de agregado grueso reciclado [Producc CAR]** se calcula según la expresión (4.10).
- f. El valor inicial de **acopio configurado de agregado grueso reciclado [ACAR]** es cero, ya que no hay antecedentes de producción de agregados reciclado en la zona a escala industrial.
- g. **Producción de hormigón con agregado grueso reciclado [Producc HAR]** se calcula según la expresión (4.12).
- h. El valor de **Reemplazo** que se adopta es igual a cero ya que no se tienen antecedentes de utilizarse agregados reciclados ni en forma total ni parcial para la elaboración de hormigones.

4.3.1.2.3. Subsistema obras de hormigón

- a. Como valor inicial de la variable **obra de hormigón con agregados gruesos naturales [Obras HAN]** se adopta la producción de hormigón durante el año 1999, que fue de 1.092.397,5 metros cúbicos.
- b. En función de los datos relevados la **demolición [DE]** de hormigón promedio en los últimos 10 años fue de 7000 m³/años, equivalente a demoler 19,44 m³/día. Para transformar este flujo de volumen en masa de agregado reciclado, se considera la densidad, el porcentaje en masa de agregado del hormigón patrón y la factibilidad de recuperar un 80% de la masa de agregado del hormigón natural, obteniendo un valor de demolición igual a 15,3 Tn/día. El flujo de demolición varía también en función de la capacidad productiva, en este modelo representado por el coeficiente de capacidad productiva.
- c. Con el objeto de evaluar la generación de **desechos** en el periodo de análisis se adopta como un valor inicial igual a cero.
- d. Por datos disponibles el valor de **reciclar y obras de hormigón realizadas con agregados reciclados [Obras HAR]** es igual a cero.

En la tabla 4.3 se realiza una síntesis de los valores iniciales de las variables para la simulación del periodo comprendido entre los años 1999 y 2002.

4.3.1.3. Resultados de la simulación para el periodo comprendido entre los años 1999 y 2002.

En la figura 4.7. se muestra la evolución simulada en el tiempo de las variables: obras de hormigón con agregados reciclados, desechos de agregados gruesos producto de la demolición, coeficiente de capacidad productiva, producción de hormigón con agregados naturales que en el modelo se supone que es el mismo que produce los HAR y permite analizar la evolución de la industria del hormigón y

Capítulo 4

por último la variable que representa las obras de hormigón con agregados naturales acumuladas en el periodo.

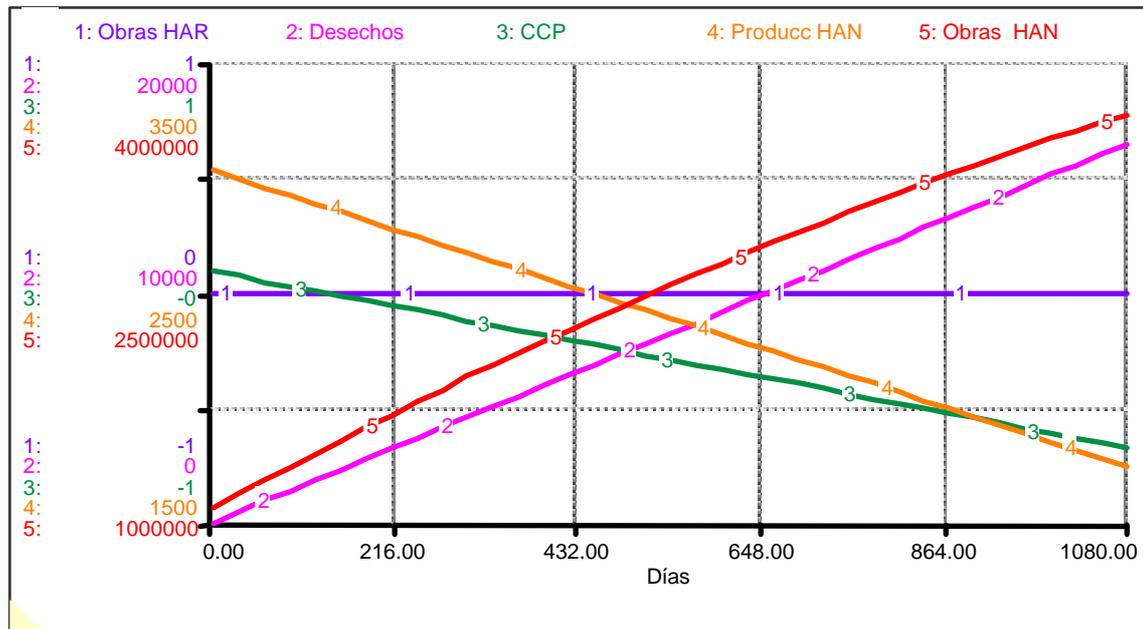


Figura 4.7. Simulación en el periodo comprendido entre los años 1999 - 2002

De los resultados se puede inferir:

- La evolución del volumen de obras de hormigón con agregados reciclados [Obras HAR], resulta una recta paralela al eje de las x de ordenada igual a cero; es decir, la simulación al igual que el análisis de antecedentes indican que no se realizaron obras de hormigón con agregados reciclados, por consiguiente, la variable "Producción HAR" también resulta igual a cero durante todo el periodo.
- Los desechos de agregados grueso provenientes de la demolición de obras de hormigón responden a un crecimiento lineal y la masa de los mismos al finalizar el periodo modelado es de 13.106,1 Tn equivalente en forma aproximada a 5.139 m^3 . Se adoptó como densidad de los agregados reciclado 2,55 que resulta del promedio de los valores experimentales ilustrados en el capítulo tres.
- El desperdicio de agregado grueso producto de la industria del hormigón [2% del total de la producción] resulta 40.064 Tn.
- Sumando los desperdicios de la producción más los desechos obtenemos el total de residuos de agregados gruesos que resultan **de 53.170 Tn**.
- El coeficiente de capacidad productiva [CCP] que en el modelo tiene un valor inicial de cero, llega a valores negativos, esto se debe interpretar como una disminución de la capacidad productiva en la industria de los agregados, del hormigón y del sector dedicado a la demolición, lo que replica lo sucedido en el periodo simulado (cierres de plantas de hormigón elaborado y canteras).

Variables	Unidad	Valores iniciales
Subsistema Desarrollo y Adopción		
Coeficiente de capacidad productiva [CCP]	Unidad de producción/tiempo/ Unidad de producción/tiempo [CCP]	0
Demanda	[CCP/día]	-0.00039
Aceptación	[A]	0
Adopción	[A/día]	0
Subsistema Productor		
Producción de agregado grueso natural [Producc AN]	[Tn/día]	2.986
Acopio de agregado grueso natural [Acopio AN]	[Tn]	2.986.000
Producción de hormigón con agregado grueso natural [Producc HAN]	[m ³ /día]	2986
Desperdicios	[Tn/ m ³]	0.015744
Producción configurada de agregado grueso reciclado [Producc CAR]	[m ³ /día]	0
Reemplazo	[m ³ /Tn]	0
Acopio configurado de agregado grueso reciclado [ACAR]	[m ³]	0
Producción de hormigón con agregado grueso reciclado [Producc HAR]	[m ³ /día]	0
Subsistema obras de hormigón		
Obras de hormigón con agregado grueso natural [Obras de HAN]	[m ³]	1.092.397,5
Demolición [DE]	[Tn/día]	15,3
Desechos	[Tn]	0
Obras de hormigón con agregados reciclados [Obras de HAR]	[m ³]	0
Reciclar	[m ³ /día]	0

Tabla 4.3: Valores iniciales de las variables para el periodo comprendido entre los años 1999 al 2002.

- f. La evolución de la producción de hormigones con agregados naturales decrece, como se observa en la recta de la figura 4.7, con una pendiente mayor a la del coeficiente de capacidad productiva durante el periodo analizado. Esto refleja que en la industria del hormigón la recesión económica tiene un fuerte impacto tal como se analizó en el capítulo tres.
- g. El volumen de hormigón producido con agregados naturales acumulados [Obras HAN] y el volumen de hormigón producido con agregados reciclados acumulados [Obras HAR] obtenidos en la simulación resultan con un comportamiento similar al relevado, tal como se puede observar en la figura 4.8. y en la tabla 4.4, donde se observan los valores de obras de hormigón con agregados gruesos naturales acumulados obtenidos con datos históricos y los obtenidos con la simulación con un porcentaje de error inferior al 6% en la tabla 4.5. se muestran los volúmenes de hormigón con agregados reciclados obtenidos en la simulación que resultan idénticos a los de datos históricos.

Año	Días	Obras de HAN [metros cúbicos de hormigón acumulados]		Diferencia [%]
		Valores obtenidos por datos históricos [VH]	Valores obtenidos en la simulación [VS]	
1999	0	1.092.397,5	1.092.397,5	
2000	360	2.019.198,5	2.092.324,4	3,62
2001	720	2.831.290,9	2.940.560,3	3,86
2002	1080	3.430.637,7	3.637.105,1	6,02

Tabla 4.4: Datos históricos y resultados de la simulación del volumen de hormigón con agregados naturales producidos acumulados.

Año	Días	Obras de HAR [Años 1999 a 2002] [metros cúbicos de hormigón acumulados]		Diferencia [%] [[VS-VH]/VH]*100
		Valores obtenidos por datos históricos [VH]	Valores obtenidos en la simulación [VS]	
1999	0	0	0	
2000	360	0	0	0,00
2001	720	0	0	0,00
2002	1080	0	0	0,00

Tabla 4.5: Datos históricos y resultados de la simulación del volumen de hormigón con agregados reciclados producidos acumulados.

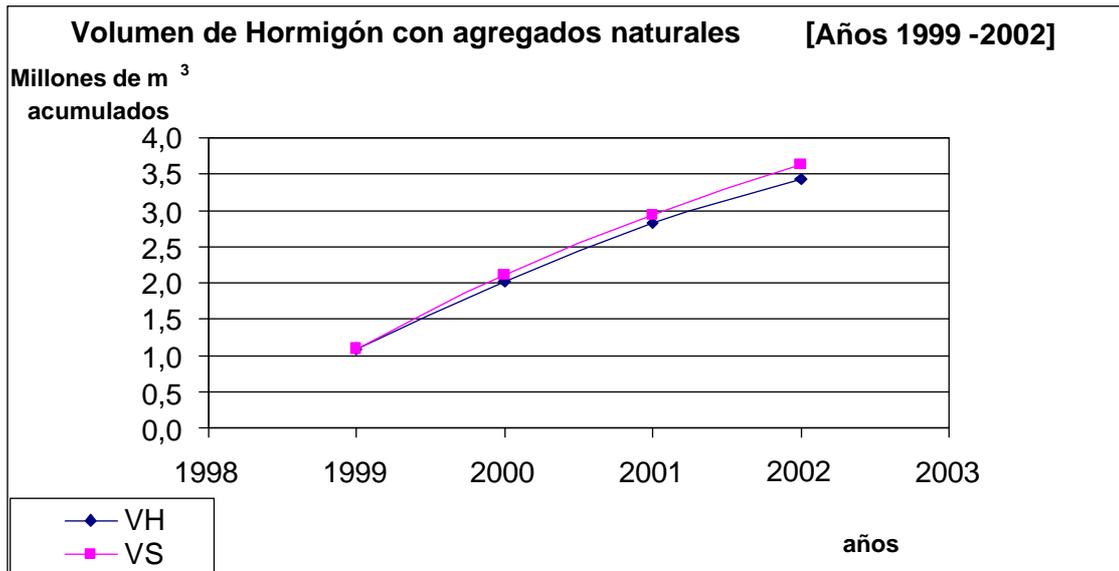


Figura 4.8: Volumen de hormigón producido acumulado con agregados naturales, datos históricos y resultados de la simulación. Periodo años 1999-2002

- h.** Como se puede observar en la figura 4.7.y corroborar en la figura 4.8 el sistema tiene un comportamiento lineal. Tratándose de una simulación llevada a cabo mediante dinámica de sistemas, para lo que se tiene una expectativa de no linealidad debido a los procesos de retroalimentación incluidos, esta respuesta lineal resulta sorprendente. Esta linealidad se explica en este caso porque para el periodo de análisis los bucles de realimentación positiva y negativa quedan anulados al no producirse el proceso de reciclado. De manera que, si bien el modelo en su estructura tiene la capacidad de generar no linealidades, en este caso particular en el que no hay reciclado de hormigón, no se activan los bucles que posibilitan el desarrollo de respuestas no lineales.

4.3.2. Simulación del periodo comprendido entre los años 2002 a 2007

4.3.2.1. Consideraciones para el análisis histórico.

Para realizar la réplica se adoptan las premisas a, b, c, d y e desarrolladas en el apartado 4.3.1.1.

- a.** En la tabla 4.6. se muestran los valores de producción de hormigón con agregados naturales que [HAN], obtenidos en función de los datos históricos de despacho de cemento publicados por la Asociación Argentina de Fabricantes de Cemento y de los supuestos anteriormente descritos.

4.3.2.2. Consideraciones para las variables del modelo.

4.3.2.2.1. Subsistema desarrollo y adopción

- a. Se toma como año de referencia el año 2002. Por tal razón el valor de “**coeficiente de capacidad productiva**” para ese año es igual a cero.

Año	Días	Obras de HAN [m ³ de hormigón acumulados] [VDH]
2002	0	599.346,8
2003	360	1.382.647,2
2004	720	2.325.384,2
2005	1080	3.478.277,2
2006	1440	4.845.601,3
2007	1800	6.317.290,9

Tabla 4.6: Obras de hormigón con agregados naturales realizadas en Córdoba durante los años 2002 al 2007.

- b. En la figura 4.9 se modela la variación del PIB en el periodo de análisis con una expresión lineal cuya pendiente es 24,817. Dado que la unidad de tiempo del modelo es el día, el valor de “**Demanda**” utilizado en el modelo es igual a 24,817 dividido 100 dividido 360, obteniéndose un valor de variación de demanda diaria de 0.00069.

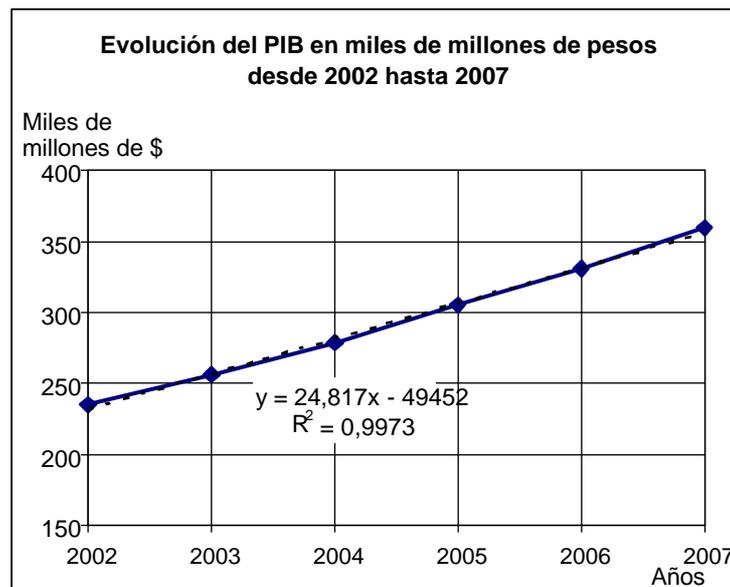


Figura 4.9: Modelación lineal del PIB entre los años 2002 y 2007. Fuente INDEC

- c. En función de relevamientos y datos propios, los valores de “**adopción**” y “**aceptación**” de los hormigones con agregados reciclados en este periodo son iguales a cero.

4.3.2.2.2. Subsistema Productor

- a. Para determinar La capacidad inicial de **producción de agregados grueso naturales [Producc AN]** se realizan las mismas consideraciones que para el periodo anterior, resultando una producción diaria de 1.638 [toneladas/días].
- b. A los efectos de que el **acopio de agregado grueso natural [Acopio AN]** no incida en la producción de hormigones con agregados naturales, el valor inicial es equivalente a 1000 días de producción es decir 1.638.000 toneladas.
- c. La capacidad inicial de **producción de hormigón con agregados grueso naturales [Producc HAN]** adoptada es igual a la producción promedio diaria de hormigón durante el año 2002, que resulta aproximadamente igual a una producción de 1638 metros cúbicos de hormigón por día.
- d. Para la determinación de los **desperdicios** se realizan las mismas consideraciones que en el periodo anterior.
- e. **Producción configurada de agregado grueso reciclado [Producc CAR]** se calcula según la expresión (4.10).
- f. El valor inicial de **acopio configurado de agregado grueso reciclado [ACAR]** es cero, ya que no hay antecedentes de producción de agregados reciclado en la zona a escala industrial.
- g. **Producción de hormigón con agregado grueso reciclado [Producc HAR]** se calcula según la expresión (4.12).
- h. Para el valor de **Reemplazo** se adopta el mismo criterio que en el periodo anterior.

4.3.2.2.3. Subsistema obras de hormigón

- a. Como valor inicial de la variable **obra de hormigón con agregados gruesos naturales [Obras HAN]** se adopta la producción de hormigón durante el año 2002 igual a 599.346,8 metros cúbicos.
- b. Se realizan las mismas consideraciones que en el periodo anterior para la determinación de la **demolición [DE]**.
- c. Con el objeto de evaluar la generación de **desechos** en el periodo de análisis se adopta cero como valor inicial.
- d. Por datos disponibles el valor de **reciclar y obras de hormigón realizadas con agregados reciclados [Obras HAR]** es igual a cero.

En la tabla 4.7 se realiza una síntesis de los valores iniciales de las variables para la simulación del periodo comprendido entre los años 2002 y 2007.

Variables	Unidad	Valores iniciales
Subsistema Desarrollo y Adopción		
Coeficiente de capacidad productiva [CCP]	Unidad de producción/tiempo/ Unidad de producción/tiempo [CCP]	0
Demanda	[CCP/día]	0.00069
Aceptación	[A]	0
Adopción	[A/día]	0
Subsistema Productor		
Producción de agregado grueso natural [Producc AN]	[Tn/día]	1.638
Acopio de agregado grueso natural [Acopio AN]	[Tn]	1.638.000
Producción de hormigón con agregado grueso natural [Producc HAN]	[m ³ /día]	1638
Desperdicios	[Tn/ m ³]	0.015744
Producción configurada de agregado grueso reciclado [Producc CAR]	[m ³ /día]	0
Reemplazo	[m ³ /Tn]	0
Acopio configurado de agregado grueso reciclado [ACAR]	[m ³]	0
Producción de hormigón con agregado grueso reciclado [Producc HAR]	[m ³ /día]	0
Subsistema obras de hormigón		
Obras de hormigón con agregado grueso natural [Obras de HAN]	[m ³]	599.346,8
Demolición [DE]	[Tn/día]	15,3
Desechos	[Tn]	0
Obras de hormigón con agregados reciclados [Obras de HAR]	[m ³]	0
Reciclar	[m ³ /día]	0

Tabla 4.7: Valores iniciales de las variables para el periodo comprendido entre los años 2002 y 2007

4.3.2.3 Resultados de la simulación para el periodo comprendido entre los años 2002 y 2007.

En la figura 4.10 se muestra la evolución en el tiempo de las variables: obras de hormigón con agregados reciclados, desechos, coeficiente de capacidad productiva, producción de hormigón con agregados naturales y obras de hormigón con agregados naturales. Considerando la respuesta del modelo, se pueden destacar algunos aspectos importantes:

- a. La simulación al igual que el análisis de antecedentes indican que no se realizaron obras de hormigón con agregados reciclados. Por consiguiente, la variable "Producción HAR" también resulta una constante igual a cero.
- b. Los desechos de agregados gruesos provenientes de las demoliciones de obras de hormigón, es decir la cantidad de agregado capaz de ser reciclado responden a un crecimiento lineal y al finalizar el periodo modelado llega a la cantidad de 44.357 Tn.
- c. Como se puede observar en la figura 4.10.y corroborar en la figura 4.11 con el volumen de hormigón el sistema tiene un comportamiento lineal. En el modelo esta linealidad se explica porque en el periodo de análisis los bucles de realimentación positiva y negativa quedan anulados al no producirse reciclado.

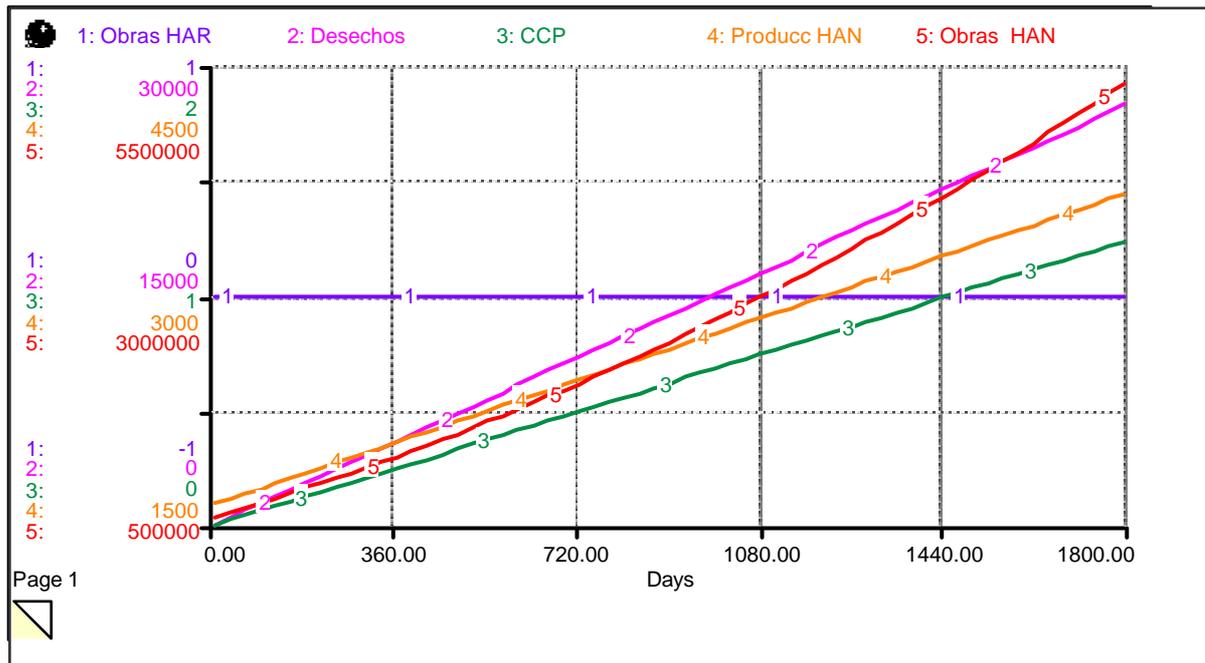


Figura 4.10. Simulación en el periodo comprendido entre los años 2002 - 2007

- d. La cantidad de agregado grueso proveniente de los desperdicios de la producción de hormigón es de 74.067 Tn .
- e. El total de residuos de agregados gruesos en este periodo es de 118.417 Tn.

- f. El coeficiente de capacidad productiva [CCP], que en el modelo tiene un valor inicial de cero, llega a un valor de 1,24 positivo, lo que muestra un crecimiento de la capacidad productiva en la industria de los agregados y del hormigón, que replica lo sucedido en el periodo simulado.
- g. La evolución de la producción de hormigones con agregados naturales crece como se observa en la recta de la figura 4.10, con una pendiente mayor a la del coeficiente de capacidad productiva durante el periodo analizado.
- h. En el periodo analizado el volumen de hormigón producido con agregado natural acumulados [Obras HAN] y el volumen de hormigón producido con agregados reciclados acumulados [Obras HAR] obtenidos en la simulación resultan con un comportamiento similar al relevado, tal como se puede observar en la figura 4.8 y en las tablas 4.8. y 4.9.

Año	Días	Obras de HAN [metros cúbicos de hormigón acumulados]		Diferencia [%] [[VS-VH]/VH]*100
		Valores obtenidos por datos históricos [VH]	Valores obtenidos en la simulación [VS]	
2002	0	599.346,8	599.346,83	
2003	360	1.382.647,2	1.250.025,98	-9,59
2004	720	2.325.384,2	2.045.814,29	-12,02
2005	1080	3.478.277,2	2.986.710,92	-14,13
2006	1440	4.845.601,3	4.072.715,88	-15,95
2007	1800	6.317.290,9	5.303.829,16	-16,04

Tabla 4.8: Datos históricos y resultados de la simulación del volumen de hormigón con agregados naturales producidos acumulados.

- i. Como se puede observar en la figura 4.7y corroborar en la figura 4.8 con el volumen de hormigón el sistema tiene un comportamiento lineal. En el modelo se explica porque en el periodo de análisis los bucles de realimentación positiva y negativa quedan anulados al no producirse reciclado.

Año	Días	Obras de HAR [Años 2002 a 2007] [metros cúbicos de hormigón acumulados]		Diferencia [%] [[VS-VH]/VH]*10
		Valores obtenidos por datos históricos [VH]	Valores obtenidos en la simulación [VS]	
2002/07	0	0	0	0,00

Tabla 4.9: Datos históricos y resultados de la simulación del volumen de hormigón con agregados reciclados producidos acumulados.

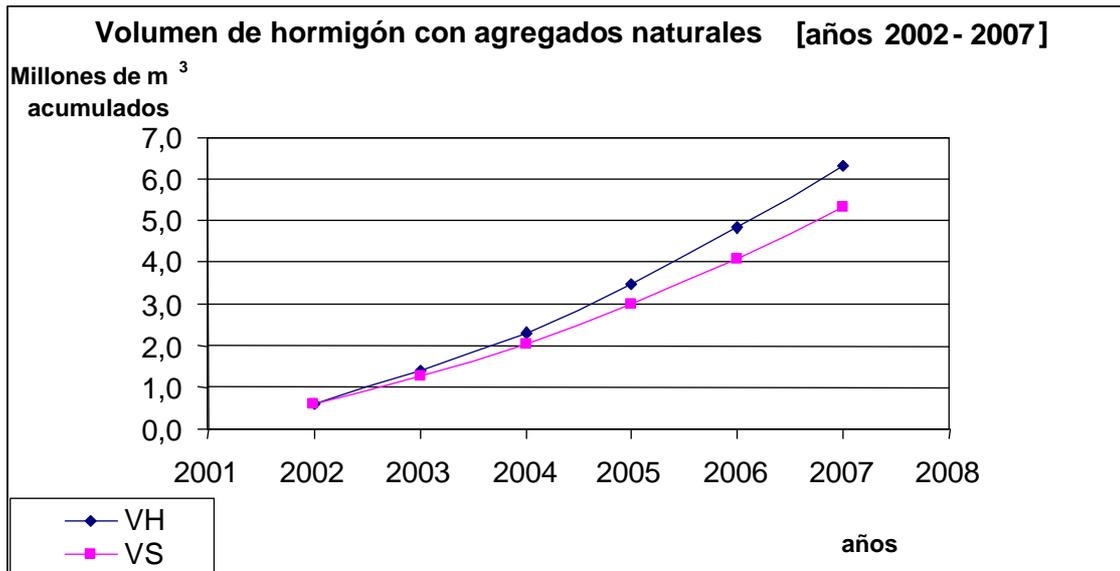


Figura 4.11: Volumen de hormigón, datos históricos y resultados de la simulación periodo comprendido entre los años 2002 y 2007

4.4. Simulación periodo comprendido entre 1999 -2007 con aceptación de los HAR

Se simula el periodo 1999 y 2007, con los datos anteriormente detalladas pero suponiendo que la adopción por parte de los usuarios de los HAR es en forma de S, como se muestra en la figura 2.1, además se considera que se utiliza el 20% de reemplazo de AR por AN (variable reemplazo = 5). El resultado se muestra en la figura 4.12.

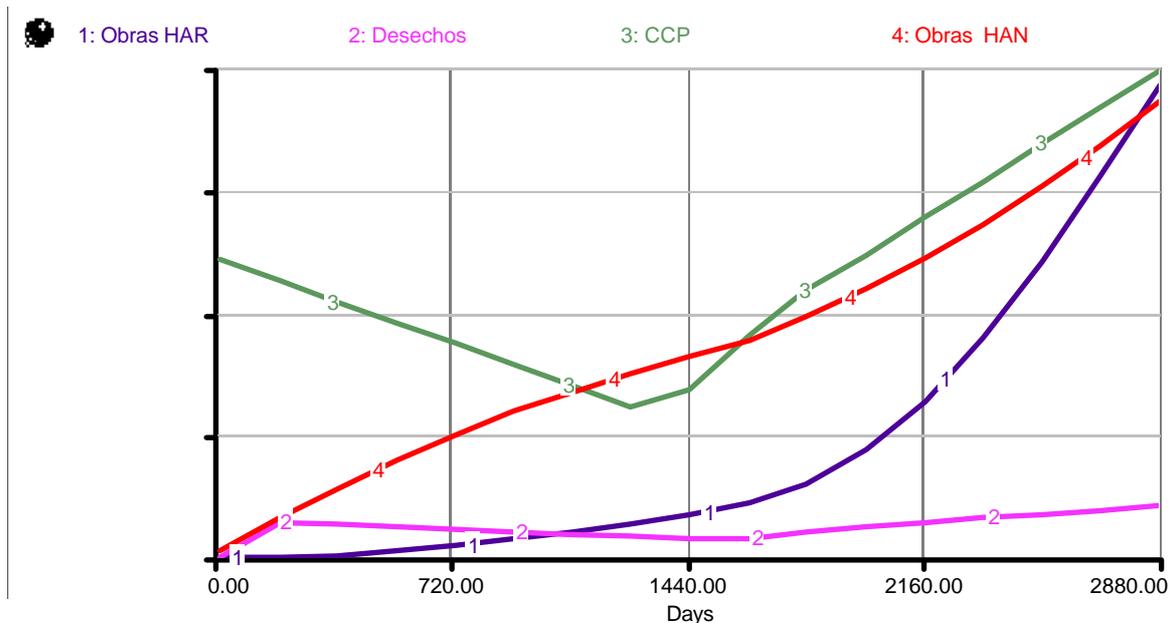


Figura 4.12. Simulación en el periodo comprendido entre los años 2002 – 2007 con aceptación de los HAR

Analizando la evolución de las variables se destaca:

- Las obras de HAR tienen un crecimiento exponencial, lo que indica que en el modelo dominan los bucles de realimentación positiva anteriormente descritos al de realimentación negativa que se muestra en la figura 4.3.
- Los desechos crecen hasta que la producción de HAR pasa a ser relevante, para luego tomar un valor casi constante.
- El coeficiente de capacidad productiva CCP tiene un evolución acorde a las variaciones de la demanda que pasa de valores negativos (periodo de recesión económica) a valores positivos.
- Las obras de HAN tienen un crecimiento suave al comienzo del periodo que luego disminuye por el incremento de la producción de los HAR, para luego continuar con un crecimiento lineal marcado por el crecimiento económico que se puede visualizar por CCP.

4.5. Consideraciones finales

En función de los criterios adoptados, el modelo de dinámica de sistemas que se ha desarrollado resulta apropiado para analizar la evolución del sistema, tanto para periodos de crecimiento como para periodos de recesión económica. Si bien el objetivo del modelo no es realizar predicciones cuantitativas, los resultados obtenidos en la simulación sólo tienen diferencias de aproximadamente 16% para un alcance temporal de 5 años, y del 5% para un alcance temporal de tres años. Estas diferencias podrían ser menores si se dispusieran de mayor cantidad de datos históricos apropiados, tales como la evolución del coeficiente de la capacidad productiva del sector, etc.

El sistema tiene un comportamiento lineal si no se interviene favoreciendo la difusión de los HAR. Es decir para que el sistema despliegue respuestas no lineales es preciso que se recicle, que es lo que activa los bucles y conduce a respuestas que se aportan de las lineales.

4.6. Referencias

¹ <http://www.unctad.org/Templates/Page.asp?intItemID=3894&lang=3>

² Godoy L. A. y Bartó C. A. [2003]. "Validación y Valoración de Modelos en la Dinámica de sistemas". Revista Argentina de Enseñanza de la Ingeniería, Vol. 3, Pág. 31-47. Argentina.

Capítulo 5

Aplicación del modelo para la simulación de escenarios

5.1. Introducción

En este capítulo se simulan tres tipos de escenarios para un horizonte temporal de cinco años. Se adopta la premisa que durante el tiempo simulado y en las diferentes condiciones en que se plantean los escenarios, la estructura del sistema no se modifica. Los escenarios planteados se los denominan: escenarios tendencial que continua las tendencia del sistema actual; escenario pesimista en donde se simula la peor situación y escenario optimista en donde se explicita el comportamiento del sistema que favorece la difusión de los hormigones con áridos reciclados.

5.2. Escenario tendencial

Este escenario se construye extrapolando las tendencias actuales de las variables del sistema y suponiendo que los actores del sistema continúan con la conducta desarrollada. Desde el punto de vista económico se considera un crecimiento del producto Bruto Interno con un ritmo más suave que en el periodo comprendido entre los años 2002 y 2007, en relación a la adopción y los demás factores se adopta la tendencia analizada durante el periodo 2002 y 2007.

A continuación se detallan los supuestos realizados para cada subsistema y los valores de las variables.

5.2.1. Subsistema desarrollo y adopción

- a. El Senado de la Nación Argentina fijó el Presupuesto General de la Administración Nacional para el ejercicio fiscal correspondiente al año 2009¹, previendo un crecimiento del PBI igual al 4% para el año 2009. Para el alcance temporal de este análisis (5 años) se considera que el crecimiento del PBI será constante e igual al del año 2009 para todos los años, subsiguientes resultando el valor de la variable “**demanda**” igual a 0,00011 (CCP/día).
- b. Se fija como año de referencia e inicial el 2008, por lo que el “**coeficiente de capacidad productiva**” para este año es igual a cero [Unidad de producción/tiempo/Unidad de producción/tiempo].
- c. Para la producción de áridos reciclados, tal como se analizó en el capítulo 3, se necesita la misma tecnología que para la producción de áridos naturales, más la tecnología necesaria para las etapas correspondientes a la demolición, eliminación de contaminante y traslado desde los lugares de demolición (en general zonas urbanas) a los lugares de producción de áridos (zonas rurales). Esto implica que, en la actualidad, los áridos reciclados resultan más caros que los áridos naturales y dado que no hay ninguna medida económica, tecnológica o social tales como las descriptas en el capítulo tres, que pueda favorecer desde un punto de vista económico, tecnológico y social la adopción de los hormigones con áridos reciclados se asigna un valor de cero a la “**adopción**” (A/día) e igual valor a la “**aceptación**” (A).

5.2.2. Subsistema Productor

- a. En el escenario tendencia se mantienen las características del hormigón patrón explicitadas en el capítulo 4.
- b. Se supone que para el periodo a simular el consumo de cemento en la Provincia de Córdoba en relación al consumo en el país, se mantiene constante e igual al valor promedio de los últimos tres años, es decir del 12,45%.
- c. Del total de cemento a producirse se considera que el 43% (tendencia que se observa en la figura 3.3) es para el consumo a granel y por consiguiente destinado a la industria del hormigón elaborado y pretensado, sector productor que se modela.
- d. El despacho de cemento para consumo interno durante los meses transcurridos del año 2008, según lo informado por AFCEP, se muestra en la tabla 5.1.
- e. Para la determinación de la capacidad de “**producción de hormigones con áridos grueso naturales (Producción HAN)**” [m³/día]. Se consideran los supuestos a, b, c, y d realizados y que el hormigón consumido refleja la

capacidad de producción instalada, adoptando como valor inicial de la producción igual a 4448 m³/día.

$$\text{Producc HAN} = (((810157/0.325)*0.1245*0.43)/30) = 4448 \text{ m}^3/\text{día}$$

Mes	Toneladas
Enero	796.308
Febrero	767.339
Marzo	700.101
Abril	890.140
Mayo	826.040
Junio	704.971
Julio	878.337
Agosto	831.019
Septiembre	897.167
Valor promedio	810.157

Tabla 5.1: Despacho de cemento para consumo interno. Fuente: AFCP

- f. La capacidad inicial de **producción de áridos grueso naturales (Producc AN)** (Tn/día) es de 4.448 Tn/día, asumiendo que es igual a la necesaria para la producción de hormigones con áridos naturales.
- g. A los efectos de que el **acopio de árido grueso natural (Acopio AN)** (Tn) no incida en la producción de hormigones con áridos naturales, el valor inicial es equivalente a 1000 días de producción, es decir 4.448.000 toneladas.
- h. Los **desperdicios** (Tn/m³H) de la producción de hormigones se asume constante para todo el periodo e igual los 2% del volumen de hormigón producido. Dadas las características del hormigón patrón y la factible de recuperar 80 % de los áridos, el valor de desperdicio es 0.015744 (Tn/m³H).
- i. **Producción configurada de árido grueso reciclado (Producc CAR)** (m³/día) se calcula según la expresión (4.10).
- j. El valor inicial de **acopio configurado de árido grueso reciclado** (m³) (ACAR), en función de los datos relevados, es de cero.
- k. **Producción de hormigón con árido grueso reciclado (Producc HAR)** (m³/día) se calcula según la expresión (4.12).
- l. El valor de **Reemplazo** (m³/Tn); se adopta igual a cero, en función de los antecedentes analizados.

5.2.3. Subsistema obras de hormigón

- a. Como valor inicial de la variable **obra de hormigón con agregados gruesos naturales (Obras HAN)** (m³) se adopta la producción de hormigón

acumulada calculada durante el año 2007 determinada en función de datos históricos que se muestra en la tabla 4.6 que es de 6.317.290,9 metros cúbicos.

- b. En función de los datos relevados y las consideraciones explicitadas en el capítulo 4 punto 4.3.1.2.3, la **demolición (DE)** [Tn/día] adopta un valor de 15.3 m³/día.
- c. Con el objeto de evaluar la generación de **desechos** [Tn] en el periodo de análisis, se adopta como un valor inicial igual a cero.
- d. En función de los datos disponibles, el valor inicial de **reciclar y obras de hormigón realizadas con agregados reciclados (Obras HAR)** es igual a cero.

La tabla 5.2 contiene una síntesis de los valores iniciales de las variables para la simulación del escenario tendencia.

5.2.4. Resultados de la simulación

En la figura 5.1 se muestra la evolución simulada en el tiempo de las variables: obras de hormigón con áridos reciclados, desechos, coeficiente de capacidad productiva, producción de hormigón con áridos naturales y obras de hormigón con áridos naturales. Se puede observar que resulta similar a la figura 4.10 en donde se simulaba el periodo comprendido entre los años 2002 y 2007. En la nueva simulación se presentan pendientes más suaves, dado que el crecimiento del PBI previsto que activa la industria es menor.

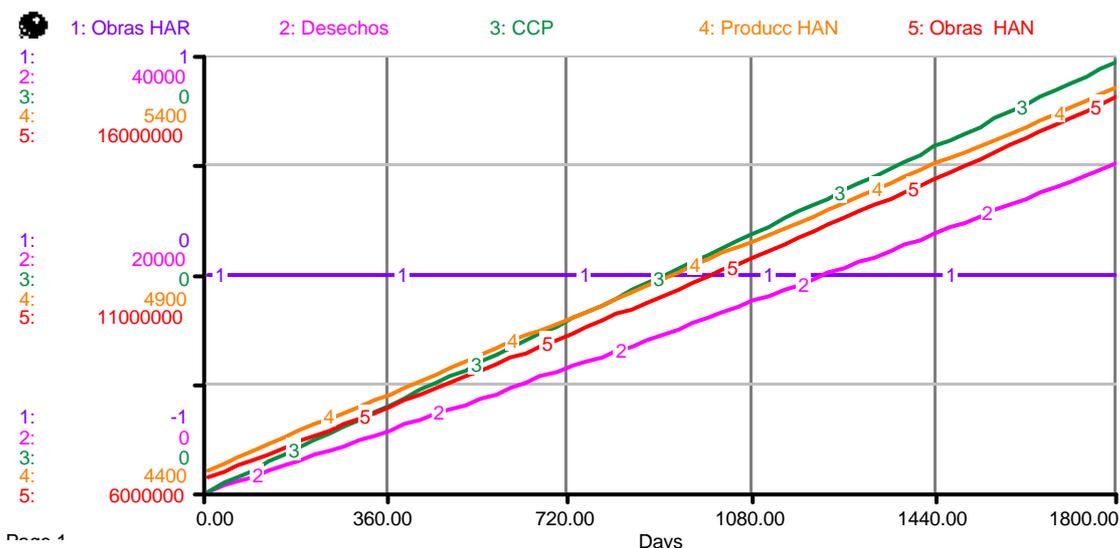


Figura 5.1. Escenario Tendencia.

De las variables graficadas se destaca:

- a. La evolución del volumen de obras de hormigón con áridos reciclados (Obras HAR), resulta una recta paralela al eje de las x de ordenada igual a

cero, lo que implica que la “Producción HAR” es también cero. Esto se debe a la falta al factor de adopción, ya que existe un crecimiento económico, sistema productivo instalada y áridos factibles de reciclar

- b. Los desechos de áridos gruesos provenientes de las demoliciones de obras de hormigón, es decir la cantidad de agregado capaz de ser reciclado, responden a un crecimiento lineal que al finalizar el periodo modelado llega a la cantidad de 30.221Tn.

Variables	Unidad	Valores iniciales
Subsistema Desarrollo y Adopción		
Coeficiente de capacidad productiva [CCP]	Unidad de producción/tiempo/ Unidad de producción/tiempo [CCP]	0
Demanda	[CCP/día]	0.00011
Aceptación	[A]	0
Adopción	[A/día]	0
Subsistema Productor		
Producción de árido grueso natural [Producc AN]	[Tn/día]	4448
Acopio de árido grueso natural [Acopio AN]	[Tn]	4.448.000
Producción de hormigón con árido grueso natural [Producc HAN]	[m ³ /día]	4448
Desperdicios	[Tn/ m ³]	0.015744
Producción configurada de árido grueso reciclado [Producc CAR]	[m ³ /día]	0
Reemplazo	[m ³ /Tn]	0
Acopio configurado de árido grueso reciclado [ACAR]	[m ³]	0
Producción de hormigón con árido grueso reciclado [Producc HAR]	[m ³ /día]	0
Subsistema obras de hormigón		
Obras de hormigón con agregado grueso natural [Obras de HAN]	[m ³]	6.317.290,9
Demolición [DE]	[Tn/día]	15,3
Desechos	[Tn]	0
Obras de hormigón con agregados reciclados [Obras de HAR]	[m ³]	0
Reciclar	[m ³ /día]	0

Tabla 5.2: Valores iniciales de las variables para la simulación del escenario tendencia.

- c. La cantidad de árido grueso proveniente de los desperdicios de la producción de hormigón es de 137.848 Tn (2% del total de hormigón producción en el periodo y suponiendo que el hormigón es el patrón definido en el capítulo 4).
- d. El total de residuos de áridos gruesos en este periodo sumando los desechos y los desperdicios, es de 168.069 Tn.
- e. El coeficiente de capacidad productiva (CCP) la evolución de la producción de hormigones con áridos naturales y el volumen de hormigón producido con agregado natural acumulados (Obras HAN), tienen un crecimiento lineal similar al obtenido en periodo comprendido entre los años 2002 y 2007.

5.3 Escenario pesimista

Para la elaboración de este escenario se supone una catástrofe natural con recesión económica lo que genera gran volumen de desechos de la construcción, pero sin haber logrado desarrollar normativas ni aceptación por parte de los usuarios de los hormigones con agregados reciclados. La conducta de los actores es similar a la adoptada en periodos de crisis económica. Para la simulación de este escenario se considera: que el PBI decrece en forma similar al periodo analizado entre los años 1999 al 2002, que la adopción y la aceptación son nulas, continuando con la tendencia histórica, y que como producto de una catástrofe el flujo inicial de demolición adquiere valores como el generado en el sismo de Turquía en 1992 de un millón de toneladas en el año como fue informado por Gómez Soberón. Entonces el valor de demolición resulta igual a 2.777 [Tn/día].

A continuación se detallan las variables en función de los subsistemas.

5.3.1. Subsistema desarrollo y adopción

- a. Disminución del PBI en forma similar a la del periodo 1999-2002, resultando el valor de la variable “**demanda**” igual a -0.00039 [CCP/día].
- b. Se fija como año de referencia e inicial el año 2008, por lo que el “**coeficiente de capacidad productiva**” para ese año es igual a cero [Unidad de producción/tiempo/Unidad de producción/tiempo].
- c. Se asigna un valor de cero a la “**adopción**” [A/día] e igual valor a la “**aceptación**” [A].

5.3.2. Subsistema Productor

- a. Los valores iniciales de las siguientes variables se suponen con los mismos valores que en el escenario tendencia: **Producc HAN** [m³/día], **Producc AN** [Tn/día], **Acopio AN** [Tn], **desperdicios** [Tn/m³H], **Producc CAR**[m³/día], **acopio configurado de árido grueso reciclado** [m³], **Producción de**

hormigón con árido grueso reciclado [Producc HAR] [m³/día] y Reemplazo [m³/Tn]

5.3.3. Subsistema obras de hormigón

- a. Se supone que las siguientes variables adoptan los mismos valores que en el escenario tendencia: **Obras HAN** [m³], **Desechos** [m³], **Obras HAR**[m³].

Variabes	Unidad	Valores Iniciales
Subsistema Desarrollo y Adopción		
Coeficiente de capacidad productiva [CCP]	Unidad de producción/tiempo/ Unidad de producción/tiempo [CCP]	0
Demanda	[CCP/día]	-0.00039
Aceptación	[A]	0
Adopción	[A/día]	0
Subsistema Productor		
Producción de árido grueso natural [Producc AN]	[Tn/día]	4448
Acopio de árido grueso natural [Acopio AN]	[Tn]	4.448.000
Producción de hormigón con árido grueso natural [Producc HAN]	[m ³ /día]	4448
Desperdicios	[Tn/ m ³]	0.015744
Producción configurada de árido grueso reciclado [Producc CAR]	[m ³ /día]	0
Reemplazo	[m ³ /Tn]	0
Acopio configurado de árido grueso reciclado [ACAR]	[m ³]	0
Producción de hormigón con árido grueso reciclado [Producc HAR]	[m ³ /día]	0
Subsistema obras de hormigón		
Obras de hormigón con agregado grueso natural [Obras de HAN]	[m ³]	5.317.290,9
Demolición [DE]	[Tn/día]	2777
Desechos	[m ³]	0
Obras de hormigón con agregados reciclados [Obras de HAR]	[m ³]	0
Reciclar	[m ³ /día]	0

Tabla 5.3: Valores iniciales del las variables para la simulación del escenario pesimista.

b. Demolición [DE] 2.777 [Tn/día].

En la tabla 5.3 se realiza una síntesis de los valores iniciales de las variables para la simulación del escenario pesimista

5.3.4. Resultados de la simulación

En la figura 5.2. se muestra la evolución en el tiempo de las variables: obras de hormigón con áridos reciclados, desechos, coeficiente de capacidad productiva, producción de hormigón con áridos naturales y obras de hormigón con áridos naturales. Se puede observar que las variables tienen una evolución similar a la del periodo de recesión económica comprendido entre los años 1999 2002 simulado

De las variables graficadas se observa:

- a. La evolución del volumen de obras de hormigón con áridos reciclados (Obras HAR), resulta una recta paralela al eje de las x, lo que implica que la “Producción HAR” es también cero.
- b. Los desechos de áridos gruesos provenientes de las demoliciones de obras de hormigón es decir la cantidad de agregado capaz de ser reciclado responden a un crecimiento exponencial y al finalizar el periodo modelado llega a la cantidad de 3.273.333 Tn.
- c. La cantidad de árido grueso proveniente de los desperdicios de la producción de hormigón, es de 31.010Tn (2% del total de hormigón producción en el periodo y suponiendo que el hormigón es igual el patrón definido en el capítulo 4).
- d. El total de residuos áridos gruesos es de 3.304.343 Tn.
- e. El coeficiente de capacidad productiva (CCP) y la evolución de la producción de hormigones con áridos naturales tienen una evolución lineal con pendiente negativa, siendo más pronunciada la pendiente de la producción.
- f. Las obras de hormigón con áridos naturales decrecen producto del gran flujo de demolición.

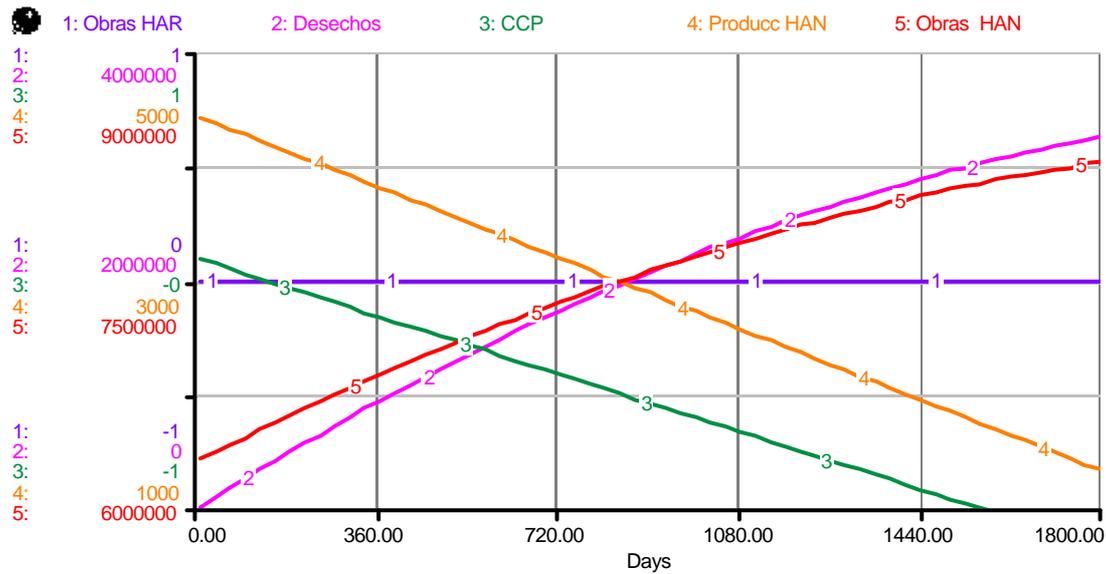


Figura 5.2. Escenario pesimista

5.4 Escenario optimista

En este escenario se supone un crecimiento económico con una evolución de PBI similar al periodo comprendido entre los años 2002 y 2007. La gran diferencia que presenta este escenario en relación a los otros simulados es la adopción de la tecnología de los hormigones con áridos reciclados, con una evolución similar a la de tecnologías exitosas en forma de "S", tal como se describió en el capítulo dos. Esto implica que se crean normativas, se incluyan en los pliegos de especificaciones técnicas de obras públicas y privadas y que resulten confiables para los usuarios. No se suponen catástrofes por lo que se considera la evolución de la industria de la demolición acorde a la evolución del producto bruto interno.

A continuación se detallan las variables en función de los subsistemas.

5.4.1. Subsistema desarrollo y adopción

- a. Crecimiento del PBI en forma similar a la del periodo 2002-2007 resultando el valor de la variable "**demanda**" igual a 0.00069 [CCP/día].
- b. Se fija como año de referencia e inicial el 2008 por lo que el "**coeficiente de capacidad productiva**" para este año es igual a cero [Unidad de producción/tiempo/Unidad de producción/tiempo].
- c. La **adopción** [A/día] adquiere la forma de "S" que se observa en la figura 5.3. y los valores se muestran en la tabla 5.4.

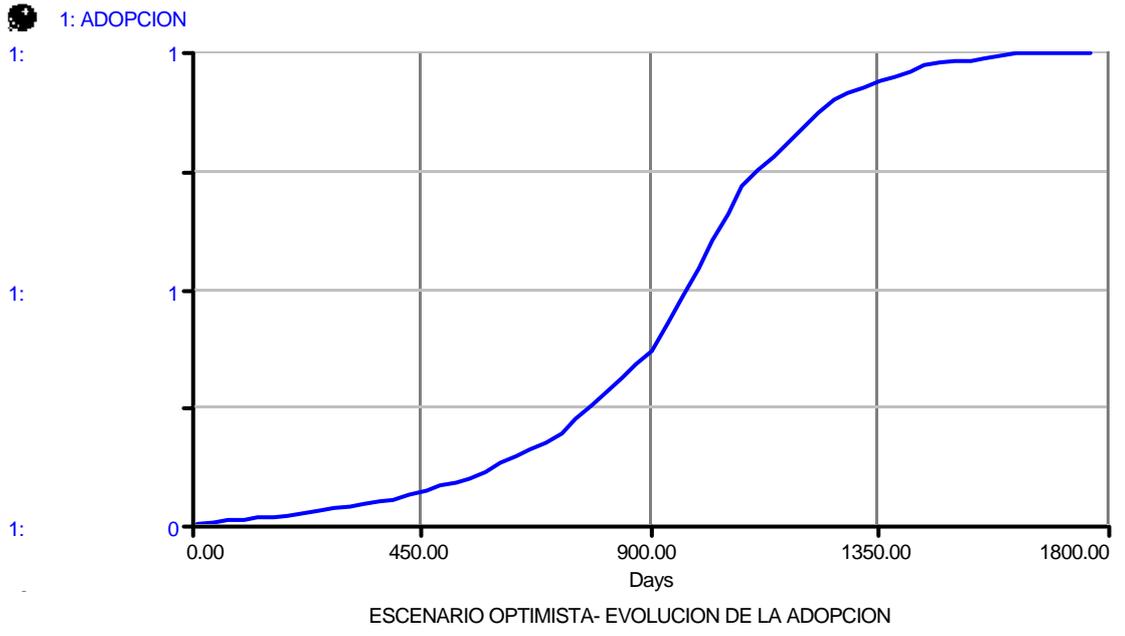


Figura 5.3. Evolución de la adopción.

Evolución de la adopción	
Días	Adopción [a/día]
0	0.000
180	0.015
360	0.045
540	0.095
720	0.190
900	0.365
1080	0.720
1260	0.905
1440	0.971
1620	1.000
1800	1.000

Tabla 5.4. Evolución de la adopción.

d. La **aceptación** inicial se considera nula.

5.4.2. Subsistema Productor

- a. Se considera que las siguientes variables tienen los valores iniciales iguales a las del escenario tendencia:
- o El consumo de cemento en la Provincia de Córdoba en relación al consumo en el país.
 - o El consumo de cemento destinado a la industria del hormigón elaborado y a la del pretensado.
 - o El hormigón patrón.
 - o La capacidad de **“producción de hormigones con áridos grueso naturales [Produc HAN]”** [m³/día].

- La **producción de áridos gruesos naturales [Producc AN]** [Tn/día].
- El **acopio de áridos gruesos naturales [Acopio AN]** [Tn].
- Los **desperdicios** [Tn/m³H].
- La **Producción configurada de áridos gruesos reciclados [Producc CAR]** [m³/día].
- **Acopio configurado de áridos gruesos reciclados** [m³] [ACAR] en función de los datos relevados es de cero.
- **Producción de hormigón con árido grueso reciclado [Producc HAR]** [m³/día].
- Valor de **Reemplazo** [m³/Tn]; se adopta igual a 5, lo que equivale a utilizar el 20% de árido reciclado del total de árido necesario para producir un metro cúbico de hormigón.

5.4.3. Subsistema obras de hormigón

- a. Se asume que las siguientes variables adoptan los mismos valores que en el escenario tendencia:
- Valor inicial de la variable **obra de hormigón con agregados gruesos naturales [Obras HAN]** [m³].
 - **Desechos** [m³].
 - **Obras de hormigón realizadas con agregados reciclados [Obras HAR]** es igual a cero.
 - **Demolición [DE]** [Tn/día].

En la tabla 5.5 se realiza una síntesis de los valores iniciales de las variables para la simulación del escenario optimista.

5.4.4. Resultados de la simulación

- a. En la figura 5.4. se muestra la evolución de la producción de los hormigones con áridos reciclados con una curva en forma de “S” similar a la de adopción, y con un crecimiento suave al finalizar el periodo debido a que esta variable depende también del crecimiento económico que continua creciendo. Es decir luego de producirse el 100% de adopción de los HAR por parte de los usuarios la producción crece porque crece la demanda que representa el crecimiento de la economía crece también la cantidad de desechos que se generan. En la curva de obras de hormigón con áridos reciclados acumulado se observa que el crecimiento se acelera luego de que la adopción supera el 50%.

Variables	Unidad	Valores iniciales
Subsistema Desarrollo y Adopción		
Coeficiente de capacidad productiva [CCP]	Unidad de producción/tiempo/ Unidad de producción/tiempo [CCP]	0
Demanda	[CCP/día]	0.00069
Aceptación	[A]	0
Adopción	[A/día]	0
Subsistema Productor		
Producción de árido grueso natural [Producc AN]	[Tn/día]	4.448
Acopio de árido grueso natural [Acopio AN]	[Tn]	4.448.000
Producción de hormigón con árido grueso natural [Producc HAN]	[m ³ /día]	4.448
Desperdicios	[Tn/ m ³]	0.015744
Producción configurada de árido grueso reciclado [Producc CAR]	[m ³ /día]	0
Reemplazo	[m ³ /Tn]	5
Acopio configurado de árido grueso reciclado [ACAR]	[m ³]	0
Producción de hormigón con árido grueso reciclado [Producc HAR]	[m ³ /día]	0
Subsistema obras de hormigón		
Obras de hormigón con agregado grueso natural [Obras de HAN]	[m ³]	5.317.290,9
Demolición [DE]	[Tn/día]	15.3
Desechos	[m ³]	0
Obras de hormigón con agregados reciclados [Obras de HAR]	[m ³]	0
Reciclar	[m ³ /día]	0

Tabla 5.5: Valores iniciales de las variables para la simulación del escenario optimista.

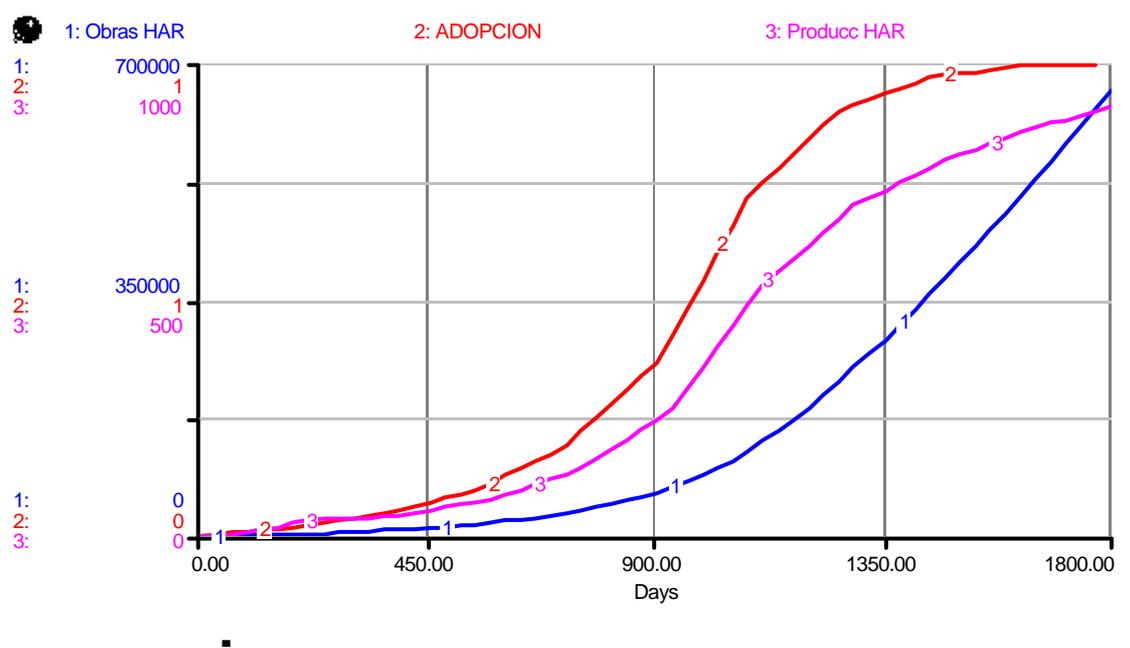


Figura 5.4: Evolución de las variables adopción, obras y producción de hormigón con áridos reciclados en un escenario optimista.

b. En la figura 5.5 se observa que la producción de hormigones con áridos reciclados [con el 20% de AR] como máximo alcanza aproximadamente el 1% de la producción de hormigones con áridos naturales. Esto se debe a que la producción de los HAR tiene como límite la cantidad de áridos reciclados. Si se realizara el total de reemplazo, es decir reemplazo igual a uno, el volumen de HAR sería de 96 m³ diario y en todo el periodo sería de 172.897 m³, lo que representa menos del 1% del total de hormigón producido en el periodo.

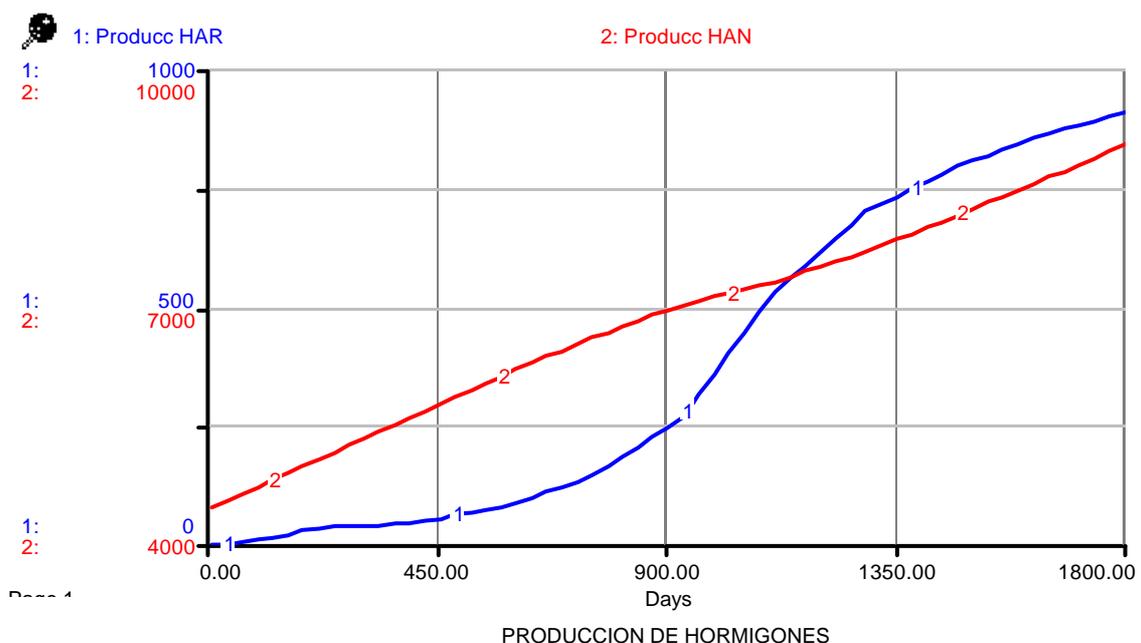


Figura 5.5: Producción de hormigones en un escenario optimista

- c. En la figura 5.6 se puede observar que la evolución de la capacidad productiva y de la producción de hormigones tiene una evolución similar al periodo entre los años 2002 y 2007 simulados.

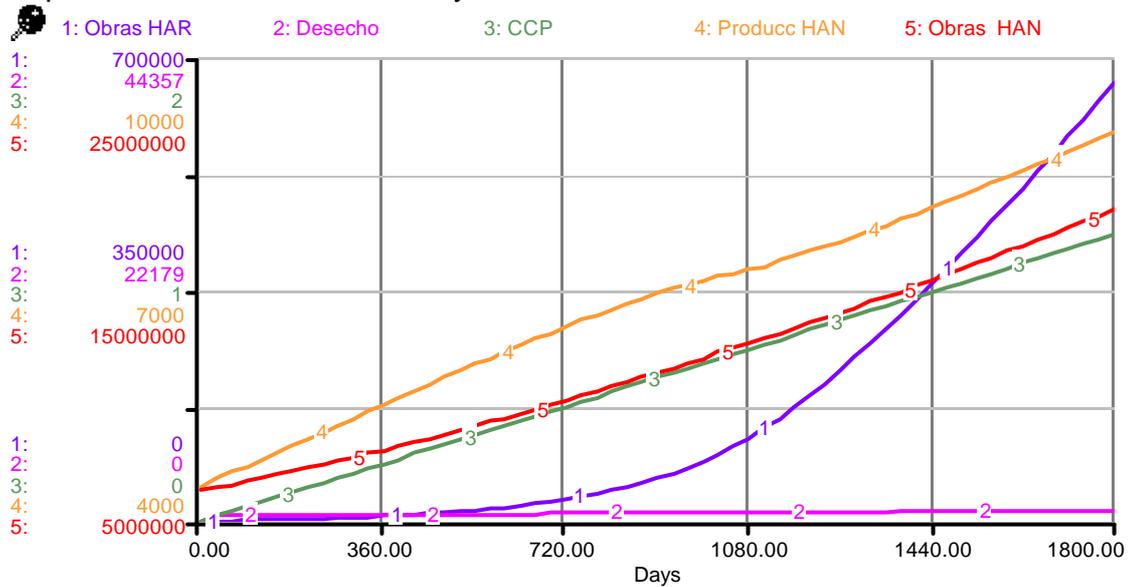


Figura 5.6: Escenario optimista.

- d. Los desechos de áridos gruesos provenientes de las demoliciones de obras de hormigón es al finalizar el periodo es de 1019 TN
- e. La cantidad de árido grueso proveniente de los desperdicios de la producción de hormigón es de cero, ya que toda se utilizó para producir áridos reciclados.
- f. El total de residuos de áridos gruesos es de 1019 Tn.

5.5. Comparación de los distintos escenarios

En la tabla 5.6 se muestran los valores de los residuos totales de agregados gruesos provenientes de los desechos generados por las demoliciones más los desperdicios de agregado grueso producto de la producción. Se observa que en todos los escenarios con excepción del pesimista, los residuos de árido grueso provienen mayoritariamente de la industria del hormigón.

Sólo cuando hay acciones que favorezcan la adopción resulta factible la producción de hormigones con áridos reciclados. Además, cuando la adopción no representa un factor limitante en la producción la disponibilidad de materia prima, es decir la cantidad de árido grueso reciclado disponible constituye en el factor limitante de la producción.

	PERIODO AÑOS 2002- 2007	ESCENARIOS años [2008-2013]		
		TENDENCIA	PESIMISTA	OPTIMISTA
Desechos de agregados gruesos producto de la demolición [Tn]	44.350	30.221	3.273.333	1.019
Desperdicios de agregados gruesos producto de la producción de hormigón [Tn]	74.067	137.848	31.010	0
Residuos totales de agregado grueso [Tn]	118.417	168.069	3.304.343	1.019
Residuos totales de hormigón [Tn]	288.823	409.925	8.059.374	2.485
Volumen total de residuos de agregado grueso [densidad relativa adoptada 2,55] [m ³]	45.438	65.909	1.295.821	400
Volumen de HAR*[m³]	0	0	0	664.031
Volumen de HAN*[m³]	5.303.829	15.072.893	8.286.949	18.504.409

Tabla 5.6: Residuos y volumen de HAR en los diferentes escenarios.

* Hormigones con el 20% de áridos reciclados.

5.6 Escenario tendencia con un alcance temporal de 50 años

En este escenario se modifica el modelo, como muestra la figura 5.7, agregando un bucle de realimentación positiva desde las obras de hormigón, que representa el efecto de mayor crecimiento de obras de hormigón debido al crecimiento demográfico y un bucle de realimentación negativa desde las obras de hormigón a la demolición ya que muchas de éstas comienzan a ser obsoletas. El resultado de la simulación se observa en la figura 5.8, en donde se muestra una evolución de los HAN en forma de S al comienzo dominan los bucles positivos del sistema y luego los negativos. Los HAR muestran un crecimiento exponencial, mientras que los desechos responde a una evolución lineal con muy poca pendiente.

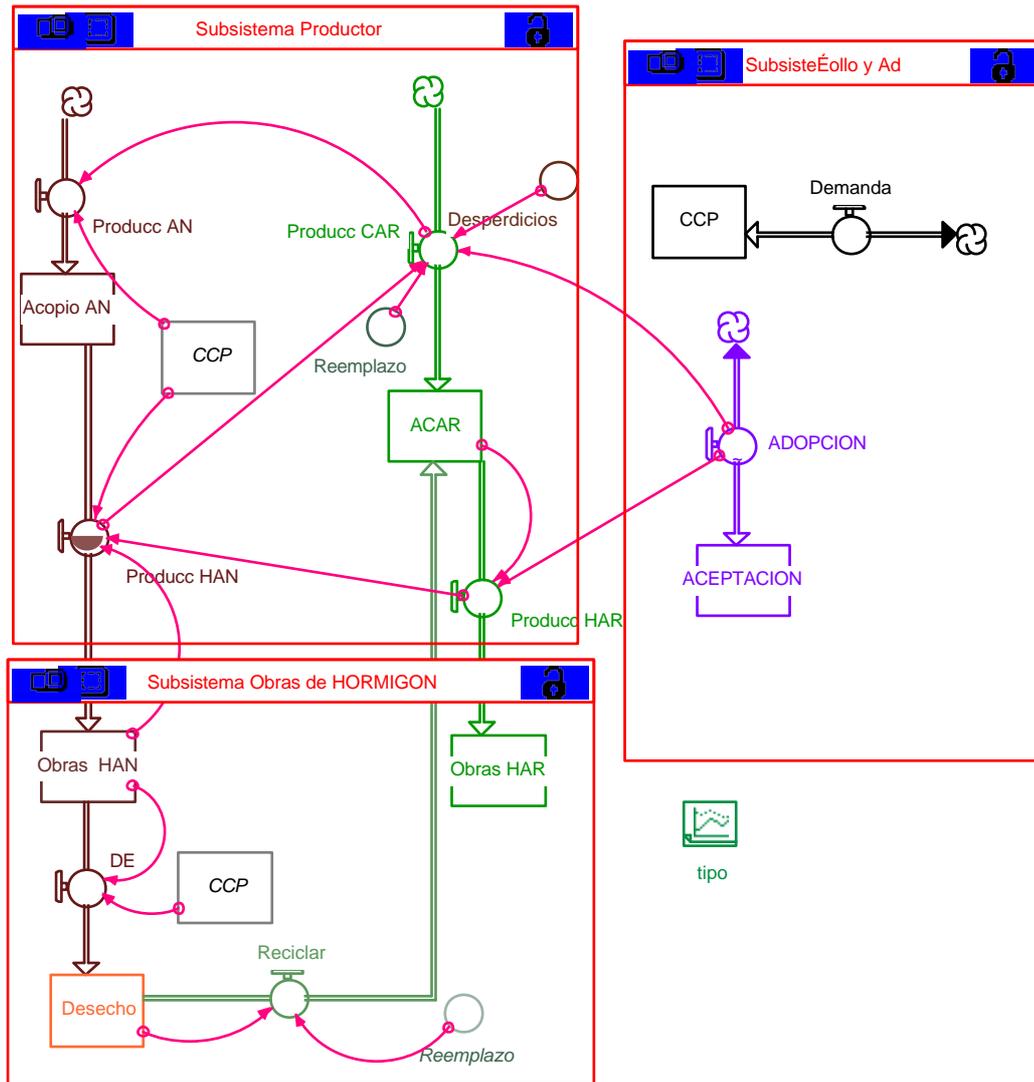


Figura 5.7: Modelo para un alcance temporal de 50 años.

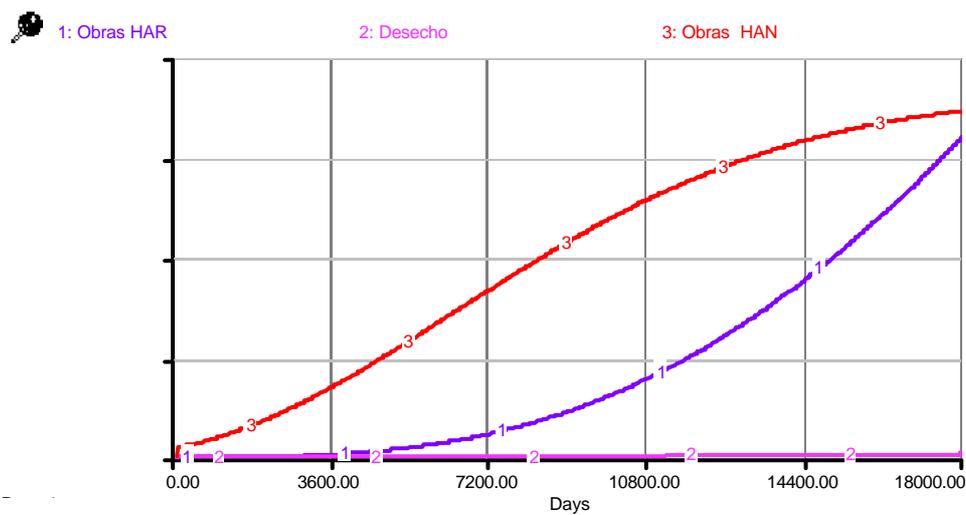


Figura 5.8: Evolución de las Obras de HAR, los desechos y las Obras de HAN para un alcance temporal de 50 años.

5.7. Consideraciones finales

De la simulación de los diferentes escenarios, es relevante destacar que:

- a. Según el criterio de utilidad para validar modelos en dinámica de sistemas, explicitado en el capítulo 4, al simular los distintos escenarios se concluye que el modelo resulta útil para detectar puntos de apalancamiento y los límites del sistema.
- b. El punto de apalancamiento del sistema es la adopción debido a que en todos los escenarios analizados se disponía de materia prima y tecnología para la producción pero resultaba necesario dinamizar la adopción para difundir los HAR
- c. Los límites de crecimiento del sistema para la difusión de los HAR en el alcance temporal utilizado y en los distintos escenarios analizados resultan: la evolución del PBI, que está representado en el modelo por la variable “demanda” ya que si éste disminuye el sistema productivo decrece pudiendo llegar a desaparecer en un tiempo que depende la capacidad productiva instalada. El otro límite lo establece la cantidad de áridos reciclados.
- d. La industria que genera la mayor cantidad de residuos de áridos gruesos, excepto en situaciones catastróficas, es la industria de la producción de hormigones (figuras, 5.9, 5.10 y 5.11) y no la de demolición (figura 5.12 y 5.13). Esto hace necesario optimizar el sistema de producción para disminuir el volumen de desechos. Esta situación se puede utilizar también como punto de apalancamiento para generar instrumentos que promuevan la utilización de los áridos reciclados por parte de los productores de hormigón.



Figura 5.9: Desechos de la producción de hormigones



Foto 5.10: Desechos de la producción de hormigones



Foto 5.11: Desechos de la producción de hormigones



Foto 5.12: Residuos de hormigón producto de la demolición de una calzada urbana contaminada con asfalto.



Foto 5.13: Residuos de hormigón producto de la demolición contaminados.

5.8. Referencias

¹ Boletín 18/08 Sesión del 5 de noviembre orden del día N° 998, “Senado de la Nación Argentina”

Capítulo 6

Conclusiones y líneas futuras de investigación

6.1. Resumen de los principales desarrollos de esta tesis

Para el análisis tecnológico y prospectivo de los hormigones con agregados reciclados, en este trabajo se caracterizaron áridos reciclados y hormigones con agregados reciclados de la zona por medio de estudios experimentales. Se analizó la factibilidad de producir HAR bajo un sistema de gestión de la calidad normalizado y con la tecnología disponible. Se delimitó y estudió el sistema para la difusión de los HAR, y se propuso un nuevo modelo para el análisis prospectivo utilizando, la dinámica de sistemas. La validación del modelo se realizó replicando momentos históricos (criterio de correspondencia entre comportamientos) y detectando posibles acciones para favorecer la difusión de los HAR (criterio de utilidad).

6.2. Conclusiones

El primer objetivo específico planteado en esta tesis era la cuantificación de las características tecnológicas de los agregados reciclados y de los hormigones con agregados reciclados, orientado a establecer la viabilidad tecnológica del estudio. Para cumplir este objetivo se llevaron a cabo ensayos de caracterización, arribándose a las siguientes conclusiones:

- De los ensayos realizados se infiere que los áridos reciclados difieren principalmente de los agregados originales por el mortero adherido. En relación a las propiedades de los áridos reciclados con respecto a los áridos originales aquellos se caracterizan por: valores de densidad

menores entre el 6 y el 9%, de 3,7 a 8,5 veces mayores valores de absorción, resistencia al desgaste entre 1,14 a 1,52 veces mayor, textura más áspera, forma menos esférica en la mayoría de los casos y de granulometría similar.

- La infraestructura necesaria para las etapas de trituración y clasificación de áridos reciclados no contaminados, es la misma que se utiliza para los áridos naturales. Las etapas de demolición, transporte y descontaminación incrementan el costo de los áridos reciclados.
- Los hormigones con áridos reciclados presentaron, en relación a los hormigones originales: mayor demanda de agua para lograr igual asentamiento en un porcentaje que se encuentra entre un 3 y 6% en el rango estudiado. Al demandar más agua, requieren más cemento para mantener la relación agua/cemento.
- La resistencia a compresión simple de los hormigones con el 100% de agregados reciclados resultaron entre el 66 y el 82% de la resistencia a compresión simple de los hormigones originales en el rango de resistencia estudiado (27,1 y 28,1 Mpa).
- Los hormigones con el total de los agregados reciclados de calidad uniforme tienen valores de resistencias a la compresión suficientes como para ser utilizado como material estructural en medios no agresivos.
- En el contexto de una organización productora de hormigón elaborado es factible la producción de hormigones con agregados reciclados, dentro de un sistema de gestión de la calidad como el propuesto en la norma IRAM 30100, incorporando procesos específicos en las etapas de: selección y evaluación de proveedores de escombros y recepción de material a reciclar.

El segundo objetivo específico planteado era desarrollar un modelo que permita simular la difusión de los hormigones con agregados reciclados. En cumplimiento de este objetivo se desarrolló un modelo usando la metodología de la dinámica de sistemas. Las conclusiones principales se pueden resumir de la manera siguiente:

- El modelo propuesto es esencialmente un instrumento de reflexión, que permitió diseñar acciones para la difusión de los hormigones con agregados reciclados. Además, el modelo permitió replicar la evolución del volumen de hormigones con áridos naturales y de hormigón con áridos reciclados producido en periodos anteriores.
- La inclusión en el modelo de la cantidad de usuarios e instrumentos regulatorios o normativos vinculados con los hormigones con agregados reciclados a través de la creación de las variables “adopción” y “aceptación” materializó los aspectos sociales y políticos del sistema. Pero la falta de datos históricos sobre la respuesta frente a nuevas

tecnologías del hormigón exitosas en el sistema, constituye una debilidad para las simulaciones realizadas.

- En todos los escenarios simulados para la difusión de hormigones se disponía de materia prima y tecnología para la producción, pero resultaba necesario dinamizar la adopción. Esto indica que la “adopción” es un punto de apalancamiento del sistema para la difusión de los hormigones con agregados reciclados.
- El modelo permite representar las solicitaciones del medio en el cual se encuentra el sistema, de las capacidades productivas de las industrias de los áridos, hormigones y demoliciones. Esto se materializa con la creación de las variables “demanda” y “coeficiente de capacidad productiva”, que en el modelo se comportan de igual forma para las tres industrias. La hipótesis de que el comportamiento de la variable “demanda” de estas industrias es análogo al flujo del PBI se considera adecuada en función de los resultados obtenidos al replicar periodos históricos.
- La dinámica de sistemas permite observar los posibles comportamientos del sistema desde un punto de vista esencialmente cualitativo, pero dicho comportamiento depende fuertemente de los aspectos cuantitativos de los datos que se ingresan al sistema, así un comportamiento exponencial o sigmoideal puede pasar a lineal.
- Los límites de crecimiento del sistema para la difusión de los HAR en el alcance temporal utilizado y en los distintos escenarios analizados son: la demanda del medio al sistema, que en el modelo evoluciona de forma análoga al PBI, ya que si la “demanda” disminuye el sistema productivo decrece pudiendo llegar a desaparecer en un tiempo que depende de la capacidad productiva instalada. El otro límite lo establece la cantidad de áridos reciclados, es decir la materia prima de los HAR.
- Si bien el modelo no pretende dar cuenta de un ajuste cuantitativo sobre las variables del mismo, se pretende que el orden de magnitud sea aproximado, en este sentido el modelo permite sensibilizarse con la problemática de los residuos que generan las industrias de demolición, la de producción de hormigón y la explotación de recursos no renovables.
- La industria que genera la mayor cantidad de residuos de áridos gruesos, excepto en situaciones catastróficas, es la industria de la producción de hormigones y no la de demolición. Esto hace necesario optimizar el sistema de producción para disminuir el volumen de desechos. Esta situación se puede utilizar también como punto de apalancamiento para generar instrumentos que promuevan la utilización de los áridos reciclados por parte de los productores de hormigón.
- En función de las simulaciones realizadas no es factible, en el alcance temporal definido, la inserción en el medio de los HAR, a no ser que

existan acciones concretas (políticas y sociales) que perturben el sistema.

El último objetivo específico estaba centrado en las acciones a realizar en la actualidad para disminuir el tiempo de ingreso al mercado de la tecnología considerada. El diagnóstico, obtenido a través de simulaciones aplicadas a situaciones previas, conduce a las siguientes conclusiones:

- En la actualidad y en el corto y mediano plazo es poco factible la utilización de los hormigones con agregados reciclados en la zona debido a:
 - La falta de instrumentos legales que avalen su utilización generan más riesgos para los profesionales responsables y desconfianza a los usuarios.
 - No existe regulación de las operaciones de demolición y acopio de desechos de la construcción, por lo que los restos se contaminan, y se depositan en forma dispersa generando costos para el reciclado.
 - Las operaciones de acopio, transporte, limpieza incrementa el costo de producción de los áridos reciclados en relación a los áridos naturales.
- Los hormigones con agregados reciclados son más caros que los hormigones con agregados naturales ya que en el contexto de este estudio, el costo de los agregados naturales es bajo debido principalmente al bajo costo de transporte entre el centro de producción y de consumo, los áridos reciclados son más caros como consecuencia de la mayor cantidad de operaciones necesarias para su producción. Además para satisfacer requisitos de resistencia, *a/c*, y asentamiento, los hormigones con áridos reciclados presentan mezclas que demandan más cemento generando más costos en relación a los hormigones con áridos naturales.
- Hay poca transferencia de saberes sobre la tecnología de los hormigones con agregados reciclados entre los actores del sistema.
- El sistema es conservador, con un comportamiento lineal fuertemente dependiente de la economía.

Finalmente las posibles acciones que pueden favorecer la difusión de los hormigones con agregados reciclados son:

- Diseñar instrumentos legales y económicos para el proceso de demolición y transporte, de tal forma de poder recuperar la máxima cantidad de áridos con el mínimo costo y consumo energético.
- Dado que los agregados reciclados compiten comercialmente con los agregados naturales, al igual que el hormigón con áridos naturales compete con el hormigón de áridos reciclados, la estrategia consiste en

fomentar la producción de agregados y hormigones reciclados por parte de los productores de agregados y hormigones naturales, a través de instrumentos legales, económicos o de valoración social (como distinciones.)

- Incorporar valor agregado a las empresas y obras que utilizan hormigones con agregados reciclados a través de campañas publicitarias.
- Propiciar el intercambio de saberes sobre: ciclo de vida de las obras, difusión de la tecnología de los áridos reciclados y de los hormigones con áridos reciclados, entre los actores del sistema a través de cursos, seminarios y diversas modalidades.
- Crear instrumentos normativos para los hormigones y áridos reciclados.
- Diseñar instrumentos legales

6.3. Posibles líneas de trabajo futuro

Esta investigación ha abordado un campo de estudio para el que prácticamente no había antecedentes sistemáticos en la literatura de la innovación en hormigón. Como tal, se abren varias líneas en las que se considera que sería fructífero llevar adelante nuevas investigaciones. Las líneas identificadas son:

- Desarrollar normativas y requisitos para los hormigones con agregados reciclados en función del porcentaje de reemplazo, del tipo de obra y del ambiente en donde se emplace la obra. Dado que la tecnología de los hormigones con agregados reciclados está en desarrollo la normativa se podría materializar en forma secuenciada comenzando por la regulación para obras de poca envergadura y en ambientes no agresivos.
- Al no existir antecedentes de la vida en servicio de obras de hormigones con agregados reciclados con más de 25 años en argentina, y que los agregados reciclados suelen estar contaminados de diversos materiales, resulta necesario intensificar los estudios de la durabilidad de los hormigones con agregados reciclados.
- Con una visión holística de la problemática plantada, es necesario optimizar el proceso de producción del hormigón elaborado, a fin de disminuir los desechos de hormigón que esta industria genera. Si bien mucho de estos desechos, se deben a las diferencias volumétricas del volumen de hormigón demandado y el volumen finalmente utilizado por los clientes. Este material generalmente queda en el camión hormigonera y es depositado en la planta. Es preciso investigar estrategias para minimizar estos procesos y disminuir los desperdicios.

Capítulo 6

- Investigar sobre metodologías de demolición de la industria de la construcción que contemplen el proceso de reciclado y que optimicen el costo y el consumo energético de reciclado.
- Evaluar los indicadores desarrollados en este trabajo, en otro análisis prospectivo de innovación en el área de la tecnología del hormigón con el objetivo de establecer un lenguaje común que permita tomar acciones en función de futuros deseados.
- Esta tesis se ha enfrentado con una situación, en la que se carece de una historia detallada, de las innovaciones en el área de la tecnología del hormigón, para comprender lo que sucedió, lo que sucede y lo que podría suceder, especialmente en el centro del país. El desarrollo de este aspecto histórico constituye una línea futura de investigación.