

2. LA CONSTRUCCIÓN EN COLOMBIA

El sector de la construcción es uno de los ejes fundamentales en el crecimiento de la economía de cualquier país o región. Sus productos inciden de forma directa e indirecta en el progreso de la sociedad y en la generación de empleo, en su mayoría mano de obra no calificada. A pesar de ser un sector tan importante en Colombia, es una actividad predominantemente cíclica, sometida a crisis que no sólo afectan la industria propiamente sino a la economía del país [6].

Ésta industria es calificada como una actividad de alto riesgo laboral, por la alta rotación de trabajadores e inestabilidad, como consecuencia del cambio permanente en las exigencias en cuanto a mano de obra de acuerdo al avance del proyecto. De igual forma, se pueden observar largas cadenas de subcontratación para el desarrollo de las diferentes actividades del proceso constructivo (estudios preliminares, excavación, cimentación, estructura, instalaciones, mampostería y acabados), por lo que el compromiso de las constructoras con los trabajadores, es un compromiso más bien mezquino.

A pesar de las utilidades económicas y de los beneficios sociales que trae consigo el desarrollo de la infraestructura a nivel nacional, es evidente la escasa inversión en investigación orientada al desarrollo de la industria. Como consecuencia surge la improvisación en los proyectos, algo que conlleva a la generación de sobrecostos y a la prolongación de los tiempos, viéndose afectados, tanto el sector como el estado y la sociedad civil. Por consiguiente, es imprescindible un cambio en los paradigmas técnico-productivos, donde se plantea la preferencia del factor experiencia sobre el técnico e investigativo. Ésta transformación debe orientarse al desarrollo social y productivo de la población con mayores necesidades [7].

2.1 CONSTRUCCIÓN DE VIVIENDAS EN COLOMBIA

La vivienda se entiende como un bien complejo que satisface necesidades y, por lo tanto, debe tener un conjunto de atributos o características que varían de acuerdo al contexto histórico y cultural. La vivienda es, igualmente, un referente espacial que le permite al hombre tener un punto fijo, permanecer en un lugar, tener arraigo [8].

A nivel urbano, la vivienda es un elemento estructurante de la ciudad que se convierte en eje fundamental de cuatro funciones básicas: residir, desplazar, trabajar y recrear [9]. En este sentido la vivienda se integra con el resto de los elementos constitutivos de

la ciudad y con los atributos que ésta le ofrece (espacio público, servicios metropolitanos).

Uno de los factores de mayor importancia, sino el de más, es el componente económico, ya que rige en gran medida los intereses y decisiones que se toman en torno a la construcción de viviendas. Especialmente, la construcción de viviendas de interés social (VIS) tiene su soporte en las políticas públicas (sociales y financieras) que determinan la orientación de la industria en este sentido. Es así como se perciben obstáculos entre el costo, la calidad de la vivienda y beneficio social, pues se pretende forjar un balance entre estos elementos.

El sector de la construcción de viviendas en Colombia es tomado como instrumento de política macroeconómica, en la que ha sido catalogado como un sector líder y eje fundamental para la reducción de los índices de desempleo y como impulsor y pilar del sector financiero. Paradójicamente se ha identificado la marcada existencia de un creciente déficit de vivienda, que según cifras de la Cámara Colombiana de la Construcción (CAMACOL), llega a ser mayor al 36%, de unidades habitacionales.

Son los elementos culturales y la falta de investigación en Colombia en el campo de la construcción, de sus materiales y procesos, los que hacen que la diversidad y las posibilidades en cuanto a la oferta de vivienda sea muy baja, siendo éste un elemento determinante del desarrollo y la competitividad del país.

2.2 SISTEMA CONSTRUCTIVO TRADICIONAL

Es el sistema de construcción más difundido en nuestro país y el más antiguo. Baza su éxito en la solidez y la durabilidad. Está constituido por estructura de pórticos en concreto reforzado.

A pesar de que estos sistemas tienen un origen relativamente antiguo, siguen siendo utilizados sin modificaciones sustanciales, para llevar a cabo proyectos nuevos. Cabe resaltar la existencia de una cantidad importante de proyectos que emplean sistemas constructivos tradicionales tanto en Colombia como en el resto del mundo, así como la fuerte valoración social que se da a los mismos. Ya que son sistemas que tienen gran aceptación, la publicidad inmobiliaria destaca considerablemente la construcción tradicional, con el propósito de generar mayor seguridad, pues en el imaginario social la construcción moderna es percibida como un producto de menor calidad.

En la actualidad, se pueden encontrar sistemas constructivos tradicionales evolucionados, estos procuran el mejoramiento económico de la edificación tradicional, reduciendo sus costos sin menguar su calidad, optimizando los proyectos.

2.3 CONSTRUCCIÓN INDUSTRIALIZADA DE VIVIENDA

Es indiscutible que en la mayor parte del planeta la construcción está en un continuo proceso de adaptación y evolución, no obstante desde hace algún tiempo no se encuentra a la vanguardia del desarrollo tecnológico -liderado en la actualidad por industrias como la cibernética, la aeroespacial, la biotecnológica, entre otras- a pesar de que actualmente se demuestra una mayor variedad de recursos y métodos para la construcción que en toda la historia.

La construcción de vivienda a través de sistemas industrializados es un concepto que está asociado a los procesos que, mediante una adecuada planeación de actividades y presupuesto y una selección acertada de equipos y materiales, generan elevados rendimientos en obra y un mejor aprovechamiento de los recursos, que se logra al introducir una especie de producción en serie, similar a los procesos repetitivos empleados en fábricas [10].

La industrialización de los procesos constructivos permite construir, mediante el uso de formaleta metálica modulada, una unidad de vivienda tipo, con el principio de rotación diaria de la formaleta que permite una velocidad de construcción con eficiente ocupación de personal. Entre los sistemas industrializados más difundidos se encuentra la construcción de vivienda cuyo sistema estructural está conformado únicamente por losas y muros en concreto.

2.3.1 Sistema tipo túnel

El sistema tipo túnel está compuesto por muros y losas macizas en concreto de alta resistencia reforzado con mallas electrosoldadas, elementos que son vaciados monolíticamente en sitio mediante el uso de formaletas de grandes dimensiones en láminas y perfilería de acero que forman semitúneles y se complementan entre sí para conformar la estructura de diseño (Figura 1). Dentro de las principales características del sistema está el uso necesario de una torre grúa para la movilización de la formaleta y en la mayoría de los casos del concreto.

Del mismo modo, el uso de los encofrados en el sistema tipo túnel admite la introducción de cajas eléctricas y pasos de tubería correctamente colocados. Las instalaciones se sujetan a la malla y las cajas se embeben a los muros. En la losa se

colocan cruces prefabricadas para colocar la formaleta de inicio de muro así como las mallas de refuerzo [10].



Figura 1. Sistema tipo túnel. PCG SYSTEMS.

2.3.2 Sistema modular liviano o mano-portable

Con el sistema mano-portable de paneles modulares, la formaleta se puede ajustar fácilmente a cualquier tipo de proyecto o diseño arquitectónico, en casas o edificios (Figura 2). Dada su fabricación el sistema permite fundir monólicamente muros y losas logrando un rendimiento de una vivienda diaria. El nivel de acabado sobre la superficie de concreto puede ser liso o con textura. El sistema de encofrado de la formaleta en aluminio está compuesto por paneles y accesorios. Los paneles son conformados por la unión entre sí de perfiles extruidos con aleación estructural. El peso promedio de un panel de 90 cm x 240 cm es de aproximadamente 40 kg [10].

2.3.3 Sistema Tilt-up

La corporación TCA (Tilt up Concrete Association), define el sistema Tilt-Up de la siguiente manera: "Es el proceso de elaborar un muro de concreto armado o un elemento de la edificación en sitio (usualmente en el piso base del edificio) y levantar (Izaje) el muro o el elemento del lugar donde se fabricó directamente a su posición final en el edificio" [10]. En la Figura 3 se observa el izaje de un elemento tipo Tilt-Up.

Los muros prefabricados son hechos de concreto y acero, se calculan de acuerdo a normas internacionales de resistencia a flexión, cargas estructurales y empujes de viento. En algunos casos se emplean con fines estrictamente arquitectónicos, por lo que su función estructural se ve relegada [11].



Figura 2. Sistema mano-portable. INDISA.



Figura 3. Sistema Tilt-Up. QUADLOCK.

3.SISTEMAS ESTRUCTURALES DE CONCRETO

En la ingeniería estructural se puede observar la existencia de modelos físicos que reflejan la disposición de sistemas compuestos de uno o varios elementos, orientados de tal forma, que tanto la estructura total como cada uno de sus componentes, sean capaces de mantenerse sin cambios considerables en su geometría durante la carga y descarga. Los diferentes modelos deben aprovechar las características particulares de cada elemento y obtener el funcionamiento más eficiente del sistema estructural global [12].

El empleo de concreto en los diferentes sistemas estructurales surge como una de las principales alternativas para el sector de la construcción para cumplir con los objetivos de seguridad y funcionalidad de los distintos proyectos, buscando una producción más eficiente y con un beneficio económico mayor para el constructor, empleando los recursos con mayor disponibilidad en cada zona.

Los sistemas estructurales fabricados a partir de concreto representan, en la actualidad, una gran parte del mercado de la construcción en Colombia, por lo que la industria y la academia deben enfocarse en la búsqueda de alternativas que permitan una mayor productividad mediante la inclusión de mecanismos y políticas que promuevan el desarrollo sostenible [12].

En la industria de la construcción, a nivel mundial, se observa una gran variedad de sistemas estructurales, en los cuales se busca una mayor productividad, funcionalidad, seguridad y sostenibilidad ambiental, particularmente en Colombia, se percibe la limitada implementación esta variedad de nuevos sistemas constructivos y estructurales, por lo que el inventario de los sistemas de mayor uso, se puede restringir al conjunto presentado a continuación.

3.1 SISTEMA DE MUROS DE CARGA

Según la Norma Colombiana Sismo-Resistente de 2010 (NSR-10), el sistema de muros de carga es un sistema estructural que no dispone de un pórtico esencialmente completo y en el cual las cargas verticales son resistidas por los muros de carga y las fuerzas horizontales son resistidas por muros estructurales o pórticos con diagonales (Figura 4) [13].

Es importante señalar con claridad que este sistema de muros de concreto, permite obtener edificaciones con gran rigidez lateral y gran resistencia frente a efectos

sísmicos. Resulta muy conveniente en relación con los edificios aporticados, por su mayor rigidez y resistencia y resulta más atractivo que los edificios de muros portantes, por el hecho de lograr con menos espesor más resistencia y evidentemente espacios mayores [13].

3.2 SISTEMA DE PÓRTICOS

El sistema de pórticos está conformado exclusivamente por un conjunto de vigas y columnas unidas en forma rígida y reticular que se encargan de la transferencia de cargas verticales y horizontales hasta la cimentación (**Figura 4.**).

Los pórticos de concreto generalmente carecen de arriostramiento; sus intersecciones entre vigas y columnas, es decir, los nudos del sistema, son los responsables de transmitir las fuerzas a través de todos los elementos hasta la cimentación, incluyendo fuerzas gravitacionales y fuerzas laterales de sismo y de viento.

Desde la vigencia del Código Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes, Decreto 1400 de 1984, CCCSR-84, las estructuras deben tener vigas en ambas direcciones. Sin embargo, es común encontrar edificaciones construidas antes de 1985 estructuradas con pórticos de concreto con vigas en una sola dirección [14].

3.3 SISTEMA DUAL

Es un sistema estructural que tiene un pórtico espacial resistente a momentos y sin diagonales, combinado con muros estructurales o pórticos con diagonales (Figura 4). La NSR-10 determina que para que el sistema estructural se pueda clasificar como sistema dual [13], se deben cumplir los siguientes requisitos:

- a)** El pórtico espacial resistente a momentos, sin diagonales, esencialmente completo, debe ser capaz de soportar las cargas verticales.
- b)** Las fuerzas horizontales son resistidas por la combinación de muros estructurales o pórticos con diagonales, con el pórtico resistente a momentos. El pórtico resistente a momentos, actuando independientemente, debe diseñarse para que sea capaz de resistir como mínimo el 25% del cortante sísmico en la base.
- c)** Los dos sistemas vinculados, deben diseñarse de tal manera que en conjunto sean capaces de resistir la totalidad del cortante sísmico en la base, en proporción a sus rigideces relativas, considerando la interacción del sistema dual en todos los niveles de la edificación, pero en ningún caso la responsabilidad de los muros estructurales, o de los pórticos con diagonales, puede ser menor del 75 por ciento del cortante sísmico en la base.

3.4 SISTEMAS COMBINADOS

De acuerdo con la NSR-10 [13], un sistema estructural combinado (Figura 4) cumple las siguientes propiedades:

- a) Las cargas verticales son resistidas por un pórtico no resistente a momentos, esencialmente completo, y las fuerzas horizontales son resistidas por muros estructurales o pórticos con diagonales, o
- b) Las cargas verticales y horizontales son resistidas por un pórtico resistente a momentos, esencialmente completo, combinado con muros estructurales o pórticos con diagonales, y que no cumple los requisitos de un sistema dual.

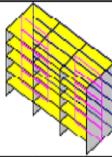
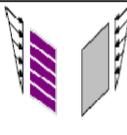
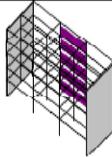
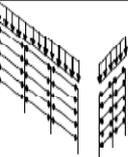
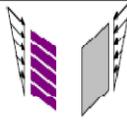
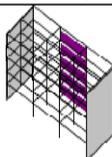
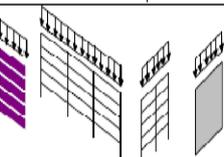
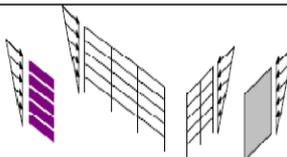
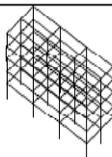
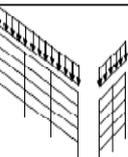
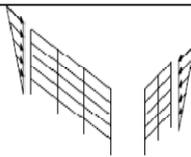
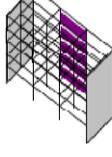
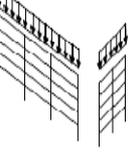
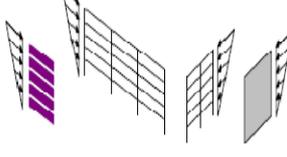
SISTEMAS ESTRUCTURALES DE RESISTENCIA SISMICA			
SISTEMA		CARGAS VERTICALES	FUERZAS HORIZONTALES
MUROS DE CARGA			
COMBINADO			
			
PORTICO			
DUAL			

Figura 4. Sistemas estructurales. NSR-10.

4.GENERALIDADES DEL CONCRETO

En la Antigua Grecia, hacia el año 500 a. C., se mezclaban compuestos de caliza calcinada con agua y arena, añadiendo piedras trituradas, tejas rotas o ladrillos, dando origen al primer concreto de la historia, usando tobas volcánicas extraídas de la isla de Santorini. Los antiguos romanos emplearon tierras o cenizas volcánicas, conocidas también como puzolana, que contienen sílice y alúmina, que al combinarse químicamente con la cal daban como resultado el denominado cemento puzolánico (obtenido en Pozzuoli). Añadiendo en su masa jarras cerámicas o materiales de baja densidad (piedra pómez) obtuvieron el primer concreto aligerado, con este material se comenzó por construir por sobre todo tuberías e instalaciones portuarias, entre las que se destacan construcciones como los diversos arcos del Coliseo romano. El amplio uso del concreto en muchas estructuras romanas ha asegurado que muchas sobrevivan hasta nuestros días En la edad media, tras la caída del imperio romano, el empleo del concreto como material estructural decayó al igual que su calidad. En el siglo XIX aparece el cemento artificial, el cemento Pórtland, el cual ha tenido gran auge global y desarrollo técnico; su nombre es debido a que le color del concreto obtenido era similar a la piedra natural de la zona de Pórtland (al sur de Inglaterra) [15].

En Colombia el uso del concreto y el cemento ha sido un elemento que ha marcado la industria de la construcción. Estos materiales han sido predominantes en la cultura y en el mercado nacional a partir de finales del siglo XIX, cuando los primeros barriles de cemento llegaron a Colombia en 1885, después de que en Inglaterra se introdujo su fabricación en hornos rotatorios. Las cantidades importadas inicialmente fueron limitadas, sin que hubiesen quedado obras que destacar, con la gran excepción del muelle de Puerto Colombia, construido en 1893 con la dirección del ingeniero cubano Francisco Javier Cisneros [16].

Actualmente el concreto es el material de construcción de mayor uso, sin embargo, su calidad final depende en forma importante del conocimiento profundo del material así como del profesional. Las posibilidades de uso del concreto son cada día mayores logrando en la actualidad ser utilizados para una extensa variedad de propósitos.

Las tecnologías de producción de concreto han alcanzado un alto nivel de desarrollo en cuanto a mecanización y automatización, siendo altas consumidoras de energía, agua y otros recursos materiales que tienen una determinante influencia en el medio ambiente.

4.1 COMPONENTES DEL CONCRETO

El concreto es el resultado de la mezcla de uno o más conglomerantes, que pueden ser de tipo calcáreo o bituminoso, áridos fino o grueso (grava, gravilla y arena), agua, aire, posibles aditivos (colorantes, aceleradores, retardadores de fraguado, fluidificantes, impermeabilizantes, etc.) y adiciones minerales. El cemento se hidrata en contacto con el agua, iniciándose complejas reacciones químicas que derivan en el fraguado y endurecimiento de la mezcla, obteniéndose al final del proceso un material con consistencia pétreo [17]. Los componentes empleados en la fabricación del concreto se describen a continuación.

4.1.1 Cemento Pórtland

Los cementantes que se utilizan para la fabricación del concreto son hidráulicos, es decir, fraguan y endurecen al reaccionar químicamente con el agua, inclusive estando inmersos en ella, característica que los distingue de los cementantes aéreos que solamente fraguan y endurecen en contacto con el aire [18].

Según las Normas Técnicas Colombianas (NTC), concretamente para la NTC121, el cemento Pórtland es un producto que se obtiene mediante la pulverización del clinker Pórtland con la adición de uno o más formas de sulfato de calcio.

En la fabricación del cemento Pórtland, se admite la adición de otros productos siempre que su inclusión no afecte las propiedades del cemento resultante. Adicionalmente, todos los productos adicionales deben ser pulverizados conjuntamente con el Clinker.

El cemento Pórtland es un polvo muy fino de color verdoso; al mezclarlo con agua forma una masa (pasta) muy plástica y moldeable que luego de fraguar y endurecer, adquiere gran resistencia y durabilidad.

4.1.1.1 Materias primas del cemento Pórtland

Las principales materias primas necesarias para la fabricación de cemento Pórtland se enuncian a continuación [19].

- **Materiales calcáreos:** deben tener un adecuado contenido de carbonato de calcio (Co_3Ca) que será entre 60% a 80%, y no deberá tener más de 1.5% de magnesia. Aquí se encuentran las margas, cretas y calizas en general, estos materiales suministran el óxido de calcio o cal.

- Materiales arcillosos: deben contener sílice en una cantidad entre 60% y 70%. Estos materiales proveen el dióxido de silicio o sílice y también el óxido de aluminio o alúmina, aquí se encuentran las pizarras, esquistos y arcillas en general.
- Minerales de hierro: suministran el óxido de hierro en pequeñas cantidades.
- Yeso: aporta el sulfato de calcio.

4.1.1.2 Componentes químicos del cemento.

La base de todos los tipos de cementos, excepto para los compuestos por alúmina de calcio, es el Clinker Pórtland, producto industrial obtenido por un proceso de fabricación en la que se combinan a alta temperatura (1450°C aproximadamente) cal, alúmina, sílice y óxido férrico, provenientes de las materias primas enunciadas anteriormente. En la Tabla 1 se presentan los componentes producto de la mezcla [20].

Tabla 1. Componentes químicos del cemento. UNE 80300:2000-IN

Componente	Fórmula química
Silicato tricálcico	$3\text{CaO}-\text{SiO}_2$
Silicato bicálcico	$2\text{CaO}-\text{SiO}_2$
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$
Ferrito aluminato tricálcico	$4\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Fe}_2\text{O}_3$
Yeso	$\text{CaSO}_4-2\text{H}_2\text{O}$

La influencia que el cemento Pórtland ejerce en el comportamiento y propiedades de la pasta cementante y del concreto, derivan fundamentalmente de la composición química del clinker y de su finura de molienda [20].

4.1.2 Agregados

Los agregados son un grupo de partículas de origen pétreo, de consistencia dura y tamaño uniforme. Éste material debe consistir en partículas con resistencia adecuada así como resistencias a condiciones de exposición a la intemperie y no deben contener materiales

que pudieran causar deterioro del concreto. Para tener un uso eficiente de la pasta de cemento y agua, es deseable contar con una granulometría continua de tamaños de partículas. Como los agregados constituyen la mayor parte del volumen total del concreto, es importante y necesaria una adecuada selección. Al ocupar alrededor de las tres cuartas partes del volumen total, los agregados tienen una influencia importante no sólo en el acabado y calidad final del concreto sino también sobre la trabajabilidad y consistencia al estado plástico, así como sobre la durabilidad, resistencia, propiedades elásticas y térmicas, cambios volumétricos y peso unitario del concreto endurecido [20]. Los agregados o áridos se dividen en dos grupos:

4.1.2.1 Finos

Los agregados finos consisten en arenas naturales o trituradas con tamaños de partícula que pueden llegar hasta 10 mm.

4.1.2.2 Gruesos

Los agregados gruesos son aquellos cuyas partículas se retienen en la malla No. 16 y pueden variar hasta 152 mm [21]. El tamaño máximo de agregado que se emplea comúnmente es el de 19 mm o el de 25 mm.

4.1.3 Agua

Casi cualquier agua natural que sea potable y que no tenga sabor u olor pronunciado, se puede utilizar para producir concreto. Sin embargo, algunas aguas no potables pueden ser adecuadas para el concreto. Se puede utilizar para fabricar concreto si los cubos de mortero producidos con ella alcanzan resistencia a los siete días iguales a al menos el 90% de especímenes testigo fabricados con agua potable o destilada [22].

Las impurezas excesivas en el agua no solo pueden afectar el tiempo de fraguado y la resistencia del concreto, si no también pueden ser causa de eflorescencia, manchado, corrosión del esfuerzo, inestabilidad volumétrica y una menor durabilidad [23].

4.1.4 Adiciones

Las adiciones finamente divididas son materiales pulverizados que se agregan al concreto antes del mezclado o durante este para mejorar o transformar algunas de sus propiedades, ya sea en estado plástico o endurecido. Estas adiciones son generalmente materiales naturales o subproductos industriales.

4.1.5 Aditivos

Las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido, se puede modificar agregando aditivos al concreto, usualmente en forma líquida, durante su dosificación [24]. Los aditivos se usan comúnmente para:

- Ajustar el tiempo de fraguado o endurecimiento
- Reducir la demanda de agua
- Aumentar la trabajabilidad
- Incluir intencionalmente aire
- Ajustar otras propiedades del concreto.

4.2 PROPIEDADES DEL CONCRETO

El concreto endurecido se transforma en un material de construcción resistente, no combustible, durable, resistencia al desgaste y prácticamente impermeable que requiere poco mantenimiento. El concreto también es un excelente material de construcción porque puede moldearse en una gran variedad de formas, colores y texturizados para ser usado en un gran número de aplicaciones.

La principal característica estructural del concreto es que resiste muy bien los esfuerzos de compresión, pero no tiene buen comportamiento frente a otros tipos de esfuerzos (tracción, flexión, cortante, etc.), por este motivo es habitual usarlo asociado al acero, recibiendo el nombre de concreto reforzado, comportándose el conjunto muy favorablemente ante diversas sollicitaciones.

El concreto de uso común, o convencional, se produce mediante la mezcla de tres componentes esenciales, cemento, agua y agregados, a los cuales opcionalmente se incorporan algunos elementos complementarios tales como los aditivos y las adiciones. Al combinar estos componentes y producir lo que se conoce como una mezcla de concreto, se puede introducir de manera simultánea un participante adicional: el aire.

La mezcla íntima de los componentes del concreto convencional produce una masa plástica que puede ser moldeada y compactada con relativa facilidad; pero gradualmente pierde esta característica hasta que al cabo de algunas horas se torna rígida y comienza a adquirir el aspecto, comportamiento y propiedades de un cuerpo sólido, para convertirse finalmente en el material mecánicamente resistente que es el concreto endurecido.

La representación común del concreto convencional en estado fresco lo identifica como un conjunto de fragmentos de roca, globalmente definidos como agregados, dispersos en una matriz viscosa constituida por una pasta de cemento de consistencia plástica. Esto significa que en una mezcla así hay muy poco o ningún contacto entre las partículas de los agregados, característica que tiende a permanecer en el concreto ya endurecido.

Consecuentemente con lo anterior, el comportamiento mecánico de este material y su durabilidad en servicio dependen de tres aspectos básicos:

- Las características, composición y propiedades de la pasta de cemento, o matriz cementante, endurecida.
- La calidad propia de los agregados, en el sentido más amplio.
- La afinidad de la matriz cementante con los agregados y su capacidad para trabajar en conjunto.

En el proceso de producción del concreto, una vez que el agua y el cemento se mezclan para formar la pasta cementante, se inicia una serie de reacciones químicas que en forma global se designan como hidratación del cemento. Estas reacciones se manifiestan inicialmente por la rigidización gradual de la mezcla, que culmina con su fraguado, y continúan para dar lugar al endurecimiento y adquisición de resistencia mecánica en el producto [25].

Los estados del concreto y sus propiedades más significativas se presentan a continuación:

4.2.1 Estado fresco del concreto

4.2.1.1 *Trabajabilidad*

La trabajabilidad mide la facilidad que tiene el concreto para ser mezclado, manipulado, transportado y puesto en obra, con los medios de compactación que se dispongan. Ésta propiedad se define en el diseño de la mezcla en relación con factores como la forma y el tamaño del elemento a construir, así como de las dimensiones y disposición del refuerzo, si éste aplica [26].

En esta propiedad se debe ser cuidadoso, puesto que el concreto debe ser trabajable pero no se debe segregar excesivamente, porque genera resultados negativos en el concreto.

4.2.1.2 Consistencia

La consistencia es la menor o mayor facilidad que tiene el concreto fresco para deformarse y consiguientemente para ocupar todos los huecos del molde o encofrado. Influyen en ella distintos factores, especialmente la cantidad de agua de amasado, pero también el tamaño máximo del árido, la forma de los áridos y su granulometría [26].

La consistencia se fija antes de la puesta en obra, analizando cual es la más adecuada para la colocación según los medios que se dispone de compactación. Se trata de un parámetro fundamental en el concreto fresco.

4.2.2 Estado endurecido del concreto

4.2.2.1 Fraguado y endurecimiento

El proceso de fraguado y endurecimiento es el resultado de reacciones físico-químicas de hidratación entre los componentes del cemento. A la fase inicial de hidratación se le llama fraguado y se caracteriza por el paso de la pasta del estado fluido al estado sólido. Al continuar las reacciones de hidratación, alcanzando a todos los componentes del cemento, se produce el endurecimiento de la masa que se caracteriza por un progresivo desarrollo de resistencias mecánicas [26].

El fraguado y endurecimiento no son más que dos estados separados convencionalmente, son en realidad un único proceso de hidratación continuo.

4.2.2.2 Permeabilidad.

Se entiende por permeabilidad como la capacidad que tiene el concreto de permitir el paso de líquidos, gases o sustancias disueltas través de sus poros. Ésta propiedad depende de factores como la finura del cemento, la cantidad de agua, la compacidad, entre otros.

El concreto es un sistema poroso, razón por la cual nunca va a ser un material totalmente impermeable, por ello es que a través de distintos aditivos y adiciones se busca controlar este parámetro. La permeabilidad del concreto es función de la permeabilidad de la pasta, del agregado y de la proporción relativa de la pasta con respecto al agregado [26].

4.2.2.3 Resistencia a la compresión

La propiedad comúnmente considerada como la más apreciable del concreto, es su resistencia a la compresión.

La resistencia a la compresión se puede definir como la máxima resistencia medida de un espécimen de concreto o de mortero a carga axial. Generalmente se expresa en Mega-Páscales (MPa) a una edad de 28 días, aunque en estructuras especiales como túneles y presas, o cuando se emplean cementos especiales, pueden especificarse tiempos menores o mayores a este. Para determinar la resistencia a la compresión, se realizan pruebas especímenes de mortero o de concreto [26].

4.2.2.4 ***Durabilidad***

la durabilidad del concreto se define como la capacidad para comportarse satisfactoriamente frente a las acciones físicas y químicas agresivas a lo largo de la vida útil de la estructura protegiendo también las armaduras y elementos metálicos embebidos en su interior.

Por tanto no solo hay que considerar los efectos provocados por las cargas y solicitaciones, sino también las condiciones físicas y químicas a las que se expone. Para incluir los efectos de durabilidad se considera el tipo de ambiente en que se va a encontrar la estructura y que puede afectar a la corrosión de las armaduras, ambientes químicos agresivos, zonas afectadas por ciclos de hielo-deshielo, etc.

Para garantizar la durabilidad del concreto y la protección de las armaduras frente a la corrosión es importante realizar un concreto con una permeabilidad reducida, realizando una mezcla con una relación agua/cemento baja, una compactación idónea, un peso en cemento adecuado y la hidratación suficiente de éste añadiendo agua de curado para completarlo. De esta forma se consigue que haya los menos poros posibles y una red capilar interna poco comunicada reduciendo los ataques al concreto [26].

5.COMONENTES ALTERNATIVOS PARA EL CONCRETO

La industria de la construcción es una de las actividades industriales que tiene mayor importancia para el desarrollo de los pueblos, sin embargo, es a su vez una de las actividades que mas impactos provocan en el ambiente [27]. Por tal razón, es preciso desarrollar alternativas que permitan mitigar los impactos e impulsar la productividad y evolución del sector de la construcción.

Una de las alternativas está fundamentada en el desarrollo de políticas y lineamientos que involucren a todos los partícipes de los proyectos tales como propietarios o desarrolladores, diseñadores, constructores, instituciones públicas, proveedores y fabricantes de materiales, con el firme propósito de reducir la huella ambiental mediante la búsqueda de materia prima con base en el desarrollo sostenible y no meramente económico.

El reciclaje, la reutilización de materiales recuperados de demoliciones en edificaciones y la implementación de subproductos industriales, permiten reducir al mínimo los costos de eliminación de residuos, y los gastos en la consecución de material así como el impacto ambiental generado en diferentes procesos industriales. Con estas disposiciones y metodologías se pretende que [28]:

- los materiales constructivos se obtengan con el mínimo consumo de materias primas y de energías, incluso con aprovechamiento y reciclaje de residuos
- los sistemas constructivos se diseñen para un proceso de construcción más eficiente, sin necesidad de improvisaciones durante la ejecución
- los procesos de ejecución de las obras impliquen el mínimo consumo de mano de obra y de energía, y que provoquen pocos escombros

Para todo ello, se pueden utilizar sistemas y procedimientos tradicionales, pero también se hace necesario adaptarse a las nuevas circunstancias de uso y aprovechar las nuevas posibilidades de materiales y productos, todo lo cual implica una continua innovación de materiales, técnicas y sistemas.

Dentro de la amplia gama de industrias existentes, una de las que presenta una mayor capacidad de absorber distintos residuos y subproductos industriales es la industria cementera que, desde hace años, está incorporando estos materiales en las diferentes etapas de su proceso productivo.

En términos de volumen utilizado, los materiales cementantes, principalmente empleados en el concreto, son los materiales más populares en el mundo. Cada año se produce, en todo el mundo, más de 1 m³ de cemento Pórtland por persona [29]. Este resultado se debe a la facilidad con que una mezcla de este polvo gris con agua puede ser transformada en un material de gran funcionalidad y fácilmente maleable a temperatura ambiente. Adicionalmente tiene un bajo costo, es un material fabricado a partir de los elementos de mayor disponibilidad en la tierra. A pesar de tener un menor impacto ambiental que la mayoría de los materiales alternos en la construcción, los cuantiosos volúmenes de cemento y de concreto producidos implican emisiones de CO₂ entre el 5 y el 8% del total de las producidas por el hombre [30]. Por lo tanto cada vez hay mayor presión para innovar y para avanzar en materia de sostenibilidad.

La necesidad de innovación y competitividad en la construcción impulsa a los empresarios e investigadores a buscar alternativas que permitan alcanzar el desarrollo, para lo cual se exploran procedimientos diversos, de igual modo se indaga por insumos alternativos que generen reducción de costos y que promuevan la optimización en la industria. Es aquí donde entran a jugar un papel importante los subproductos industriales, a partir de los cuales se originan algunas posibles adiciones minerales.

Las adiciones minerales finamente divididas se agregan al concreto como una adición o para sustituir parcialmente al cemento en el concreto o bien como una combinación de adición y sustitución. Estas adiciones pueden causar diferentes efectos en el producto final; pueden llegar a mejorar las propiedades mecánicas y microestructurales, como también pueden afectarlas negativamente, todo dependiendo del tipo de adición y la proporción utilizada, elementos que van en función del propósito de la mezcla.

Para el caso de adiciones minerales usadas en concretos de cemento Pórtland, existen organismos internacionales como el *American Society of Testing Materials*, ASTM, o para el caso colombiano, las normas técnicas nacionales establecidas por el ICONTEC, que determinan los requerimientos químicos y físicos necesarios para clasificar este tipo de productos.

Entre las adiciones más comunes, que registran una mayor investigación a nivel mundial y de las que se conocen algunas experiencias, se encuentran las cenizas volantes, la escoria de alto horno, el micro sílice y las puzolanas artificiales. Asimismo, encontramos componentes alternativos para el concreto como los agregados reciclados.

5.1 MATERIALES CEMENTANTES ALTERNATIVOS AL CEMENTO

5.1.1 cenizas volantes

Las cenizas volantes son un subproducto de los hornos que emplean carbón mineral como combustible para la generación de energía y constituyen en sí las partículas no combustibles removidas de las chimeneas de gases (Figura 5).



Figura 5. Cenizas volantes. ALIBABA.

5.1.1.1 Propiedades físicas y químicas

Las propiedades físicas y químicas de las cenizas volantes pueden variar considerablemente entre las diferentes plantas de energía, principalmente debido a las diferencias en las fuentes de carbón. En particular, la pérdida de ignición, como resultado de procesos de combustión incompleta, puede conducir a niveles inaceptables de contenido de carbono. La gran variedad de su composición química y de la calidad, plantean serios inconvenientes. Sin embargo, la industria de las cenizas volantes en los últimos años ha mejorado el control de calidad y las tecnologías desarrolladas para separar adecuadamente los residuos sin quemar [31].

Las cenizas volantes se pueden clasificar fundamentalmente en dos tipos, dentro de los que podemos encontrar las cenizas Clase F y Clase C. Las cenizas de Clase F son normalmente producidas de la quema de la antracita o de carbones bituminosos y generalmente poseen un contenido bajo de calcio. Las cenizas de Clase C son producidas cuando se queman carbones sub-bituminosos y poseen típicamente propiedades puzolánicas [32].

Las cenizas volantes están compuestas en su mayor parte de materia mineral entre un 70 y 80%, en forma de partículas básicamente vítreas con una pequeña proporción de fase

cristalina. El estado vítreo del material se debe fundamentalmente a la elevada temperatura de combustión y al rápido enfriamiento que a su vez afecta su composición mineralógica [33].

La gran mayoría de las cenizas colombianas están dentro de la clase o tipo F, por el tipo de carbón que se posee, con más del 70% de la suma de los siguientes óxidos: Si O₂ (dióxido de sílice), Al₂ O₃ (alúmina) y Fe₂ O₃ (óxido de hierro) [34].

5.1.2 escoria granulada de alto horno.

La escoria es un subproducto no metálico que está compuesto principalmente por silicatos y aluminosilicatos de calcio que se desarrollan simultáneamente en la fundición del hierro en los altos hornos. La escoria es fundida a una temperatura de aproximadamente 1500 °C, queda templada rápidamente al enfriarse por inmersión en agua y forma un material granular vítreo similar a la arena. Éste material granular es molido hasta una finura similar a la del cemento Pórtland [35].



Figura 6. Escoria granulada de alto horno. SLAGCEMENT Association.

5.1.2.1 Propiedades físicas y químicas

La escoria granulada de alto horno es un material cristalino granular que varía, dependiendo de la composición química y el método de producción, desde una estructura gruesa, triturable superior a 4,75 mm (tamiz N ° 4), hasta una estructura tamaño arena que pasa este mismo tamiz [36].

Cuando es triturada o molida hasta partículas de tamaño muy fino similares a las del cemento, la escoria granulada de alto horno desarrolla propiedades cementantes, que la convierten en una adecuada sustitución parcial o adición para el cemento Pórtland.

Al aumentar la finura hasta una apropiada, la composición química y la naturaleza cristalina de las escorias vitrificadas son tales que cuando se combina con el agua, estas escorias vitrificadas reaccionan para formar productos cementantes. La magnitud de estas reacciones cementantes depende de la composición química, contenido vítreo, y la finura de la escoria. La reacción química entre la escoria y el agua es lenta, pero es mucho mayor por la presencia de hidróxido de calcio, álcalis y yeso (CaSO_4) [37].

La escoria de alto horno es ligeramente alcalina y presenta un pH en la solución en un rango de 8 a 10. A pesar de que la escoria de alto horno contiene un pequeño componente de azufre elemental (de 1 a 2 por ciento), el lixiviado tiende a ser ligeramente alcalino y no presenta un riesgo de corrosión de acero en pilotes o de acero incrustado en el concreto hecho con escoria de alto horno de cemento o agregados [38].

5.1.3 micro sílice o humo de sílice.

El micro sílice o humo de sílice es un mineral compuesto de esferas de bióxido de silicio (SiO_2) ultrafino, amorfo y cristalino, producido durante la fabricación de silicio o ferrosilicio. Este proceso involucra la reducción de cuarzo de alta pureza en hornos de arco eléctrico a temperaturas superiores a 2000°C .

Éste material se forma cuando el gas -monóxido de silicio (SiO)- producido conforme el cuarzo se reduce y se mezcla con el oxígeno en la parte superior del horno. En este punto el SiO se oxida a SiO_2 , condensándose en las partículas esféricas puras de micro sílice que forman la mayor parte de los vapores o humo del horno. Los vapores del horno se conducen a través de tuberías de enfriamiento, por un pre-colector y ciclón para quitar las partículas gruesas que pudieran haberse arrastrado del horno y luego se soplan hacia filtros bolsa diseñados especialmente donde se recolectan [39].



Figura 7. Micro sílice. IIBCC.

5.1.3.1 Propiedades físicas y químicas

El tamaño promedio de partícula está por debajo de 0.5 micras, lo que significa que cada micro esfera es 100 veces más pequeña que un grano de cemento promedio. En una mezcla típica, con dosificación de 10% de micro sílice, habrá entre 50, 000 y 100, 000 partículas de micro sílice por grano promedio de cemento. La calidad de las materias primas y la operación de los hornos determinan la pureza del micro sílice. Aunque el material se recolecta como un polvo muy fino con una densidad en el rango de 200 kg/m³, se le puede procesar para densificarlo, haciendo la densidad a granel de alrededor de 650 kg/m³. El humo de sílice está disponible como un polvo densificado o en forma de material acuoso que tiene un color gris claro a oscuro o en ocasiones gris azulado verdoso [40].

5.1.4 Puzolanas artificiales.

Varios materiales naturales poseen, o pueden ser procesados para poseer propiedades puzolánicas. Las puzolanas artificiales son el resultado de diversos procesos industriales y agrícolas, generalmente como subproductos. Las puzolanas artificiales más importantes son la arcilla cocida, las cenizas de combustible pulverizado, la ceniza de cascarilla de arroz y la ceniza de bagazo de caña de azúcar. Estos materiales son producidos mediante la calcinación controlada [41]. Los materiales sobre los cuales se enfocará el proyecto son principalmente la ceniza proveniente de la cascarilla de arroz y del bagazo de caña.

5.1.4.1 Ceniza de cascarilla de arroz

La molienda de arroz genera un subproducto conocido como la cascarilla, la cual envuelve el grano de arroz. De la molienda de arroz alrededor del 78% del peso que se recibe es arroz partido y salvado, el restante 22% es cascarilla. Esta cascarilla se utiliza como combustible en las plantas de arroz para generar vapor en inicio de la cocción [42].

En la *Figura 8* se observa la cascarilla de arroz y la ceniza producto de su incineración en 2 etapas. De izquierda a derecha se presentan la cascarilla de arroz, la ceniza resultante de la incineración y ésta misma ceniza después de un proceso de molienda.

Propiedades físicas y químicas

La calcinación de la cascarilla de arroz da como resultado aproximadamente 75% de materia orgánica volátil y el restante 25% se convierte en ceniza durante el proceso.

La ceniza de cascarilla de arroz es un material muy fino. El tamaño medio de partícula se encuentra en un rango entre 5 y 10 micras. También es una ceniza muy rica en contenido de sílice, un contenido que generalmente es mayor del 80% [43].



Figura 8. Ceniza de cascarilla de arroz. Universidad de Malaya-Malasia.

5.1.4.2 *Ceniza de bagazo de caña de azúcar*

Varios residuos de la industria y la agricultura han demostrado tener propiedades puzolánicas. Hay estudios que manifiestan que los desechos agrícolas e industriales de la Industria Azucarera, principalmente las cenizas de bagazo de caña tienen actividad puzolánica, debido al alto contenido de sílice (SiO_2) presente en estos materiales [44].

Las cenizas de bagazo de caña han mostrado alguna actividad puzolánica comparable con los residuos de calcinación de la cascarilla de arroz, que al igual que la caña de azúcar se presenta en Colombia en cantidades importantes. [44].

Propiedades físicas y químicas

La ceniza de bagazo de caña está compuesta principalmente por dióxido de silicio, que puede desarrollar actividades puzolánicas dependiendo de las características tanto de la quema como del tamaño del bagazo. El tamaño de la ceniza, se encuentra en un rango entre 1 y 14 micras y una superficie específica cercana a los de 24 m²/g [44].



Figura 9. Ceniza derivada de la caña de azúcar- ECO-Ingeniería, 2005

5.2 AGREGADOS O ÁRIDOS RECICLADOS.

Los residuos de construcción y demolición o escombros constituyen una parte importante de todos los residuos sólidos generados. Tanto a nivel internacional como regional, incluyendo el Valle de Aburrá, Las dimensiones del problema de la generación y manejo de los escombros, está directamente relacionado con los procesos constructivos, acciones ambientales en las obras y toda la transformación urbana que sobreviene la región día a día.

En cuanto a su procedencia, los residuos sólidos tipo escombros pueden agruparse en tres categorías [45], que son:

- *Actividad industrial:* Principalmente metales, chatarra y áridos.

- *Construcción y demolición:* obras mayores, públicas y privadas.
- *Reparaciones:* domiciliarias y obras menores.

5.2.1 Propiedades físicas y químicas

Los residuos generados en las obras de construcción nuevas, demoliciones y obras de reforma no son los mismos en todos los casos, pero, en general, contienen más del 70% de materiales inertes, de origen mineral, que pueden reciclarse como áridos para distintos usos. Otro tipo de materiales que se encuentran en los residuos de construcción son tierra, papel, cartón, madera, hierro, aluminio, vidrio, plásticos, envases y embalajes, entre otros; y algunos tóxicos y peligrosos, entre los que se encuentran barnices, material aislante, pinturas, metales pesados, disolventes, siliconas, pero en menores cantidades [46].

El destino de estos materiales reciclados depende de la naturaleza o composición mayoritaria de los residuos. Así, mientras que para explanaciones suelen emplearse materiales procedentes tanto de residuos mixtos, como de asfalto, de concreto o combinaciones, para otras aplicaciones más restrictivas, como la fabricación de concreto, los áridos reciclados regularmente provienen de residuos de concreto [46], en los que se enfocará este trabajo.

El resultado de la demolición de elementos de concreto puede generar una amplia gama de tamaños de material resultante, por lo cual según la aplicación que se vaya a dar al material, es necesario triturarlo al tamaño requerido, como consecuencia se obtiene un agregado con diversa granulometría que puede ser controlada



Figura 10. Áridos triturados de concreto reciclado.

En comparación con los áridos naturales, los áridos reciclados presentan mayor porosidad y menor densidad con relación a la roca natural empleada convencionalmente como agregado. Asimismo, se puede presentar una mayor absorción de agua por parte de los áridos reciclados en comparación con el árido natural, en la mayoría de los casos sobrepasan en más del 200% los elementos de control [47].

6. CONSIDERACIONES TÉCNICAS

Unos de las áreas que genera mayor impulso en el crecimiento de la actividad constructora es la construcción de vivienda, pues está ligada directamente al crecimiento demográfico además del crecimiento económico. Asimismo, el déficit de vivienda digna hace necesario el impulso del sector en esta área, para lo cual se deben utilizar metodologías y herramientas eficientes que permitan llevar a cabo avances realmente importantes y que generen progreso y desarrollo socio-económico.

Por lo expuesto anteriormente, en este trabajo se toma un enfoque hacia sistemas de construcción industrializados, tanto fabricados “in situ” como prefabricados, puesto que este tipo de sistema son los que genera mayor productividad y rendimiento, algo fundamental al momento de pensar en vivienda de interés social, pues lo que se pretende con este tipo de vivienda es la reducción significativa de los tiempos y los costos.

Las principales ventajas de construcción de vivienda mediante sistemas industrializados con respecto a los sistemas tradicionales, los podemos enmarcar en tres áreas fundamentales [18] que son:

Calidad:

- Permite facilidad de ejecución
- Admite un mayor control de calidad
- Se consienten márgenes de error menores
- Se generan elementos estandarizados y uniformes

Economía:

- Reducción de horas improductivas
- Rapidez, que se traduce en un menor costo global

Tiempo:

- Producción simultánea
- Aumento de la productividad: tareas repetitivas

Indudablemente, gestionar de forma sostenible los recursos supone acercarse progresivamente hacia una producción limpia, propósito que precisa no sólo un menor consumo de recursos (materias primas y energía), sino la eficaz disminución de los

residuos. Esto es posible gracias a la integración (reutilización y el reciclaje) de estos residuos en nuevos procesos productivos, dando lugar a subproductos.

Diversos subproductos minerales se han utilizado como materiales cementantes suplementarios: escoria granulada de alto horno, humo de sílice, las cenizas volantes y otros productos. El rendimiento de estos materiales está estrechamente relacionado con la naturaleza fundamental de la adición. Consideraciones económicas y ambientales han acelerado el uso de estas adiciones como aditivos para el concreto o como componentes del cemento Pórtland. La selección de cada material complementario y su proporción en la mezcla de concreto está en función o el tipo y las características de rendimiento requerido y el costo [48].

Para diagnosticar la aptitud de un residuo como material complementario o alternativo en la industria de la construcción, es necesario realizar una caracterización exhaustiva, en la que se deben determinar propiedades físicas, mineralógicas, químicas, en el caso de materiales que se planteen como cementantes; un aspecto fundamental es conocer el contenido de sílice reactiva. La caracterización se debe realizar buscando tener el menor grado de incertidumbre posible sobre el comportamiento del material, y así poder realizar consideraciones acertadas en cuanto a la implementación del mismo y sus posibles aplicaciones.

Para el profesor Salazar *"Toda la muestra a ensayar deberá seleccionarse previo diseño de un método de muestreo representativo que defina unos límites de confianza de los resultados (al menos el 95%) para dar una garantía de la calidad del estudio y de su reproducibilidad. El muestreo deberá contemplar las peores y mejores condiciones de operación del proceso. Así se establecerá la variabilidad de la calidad de los residuos, pues para aplicación futura deben manejarse como materias primas de calidad conocida."* [49].

A partir de la caracterización, descrita anteriormente, se hace posible plantear un análisis para establecer el potencial de uso de los diferentes subproductos, especialmente para la elaboración de materiales de construcción.

6.1 ASPECTOS TÉCNICOS GENERALES

En este trabajo se opta por hacer énfasis en los sistemas constructivos industrializados, ya que estos tienen la potencialidad de operar con niveles inferiores de costos como consecuencia de las grandes escalas de producción para las que se plantean o son preferibles.

Desde hace algunos años se ha generalizado el uso de edificaciones destinadas a vivienda multifamiliar, teniendo como sistema estructural a los muros de concreto armado de espesores reducidos. Éste tipo de construcción se ha llevado a cabo con métodos industrializados, que permiten construir con mayor eficiencia a través del principio de rotación del encofrado, algo que demanda concretos con especificaciones muy especiales.

Uno de los retos principales en la construcción se plantea en la obtención de los materiales apropiados en el momento y precio justos, y especialmente en la construcción de vivienda con propósito social donde la reducción de costos es un factor fundamental.

Para la optimización de costos se pueden considerar diferentes alternativas, entre las que se encuentra la implementación de componentes alternativos en las mezclas de concreto que llevarían a la utilización de subproductos de la industria que en la mayoría de los casos se traduce en una reducción del precio final de la construcción.

El uso de adiciones o materiales cementantes suplementarios ofrece nuevas oportunidades a la tecnología del concreto [50]. De acuerdo a las necesidades y especificaciones mínimas que se planteen en los proyectos con respecto a las propiedades del concreto, se puede proponer el análisis y ponderación experimental de una amplia gama de complementos alternativos que resultan de distintos procesos manufactureros que actualmente se están estudiando en el mundo y que trazan un sendero en materia de sostenibilidad ambiental en una de las industrias que más impacta el medio ambiente, como lo es la construcción.

Los componentes alternativos de distinta proveniencia conciben la posibilidad de obtención de nuevos y variados tipos de concreto con diversos propósitos. Éstos se conciben con base en el ahorro de energía en el proceso de fabricación del cemento o del mismo concreto, que adicionalmente proyectan y son materia de análisis para algunos emprendedores como oportunidad de negocio.

6.2 CARACTERIZACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE LOS COMPONENTES ALTERNATIVOS

La implementación acelerada del uso de componentes alternativos en el concreto en diferentes tipos de edificaciones, ha creado la necesidad de obtener unos procesos y materiales con especificaciones y controles más precisos.

El control de calidad permite que la obra, el producto, o el material tengan verificación de las características especificadas en el proyecto y en la normatividad técnica correspondiente.

En la industria de la construcción colombiana, La Norma Sismo Resistente (NSR-10) es a partir de la cual se realiza el control de calidad de las construcciones y los materiales empleados para éstas. La NSR-10 establece que, *“para asegurarse que los materiales utilizados en la obra sean de la calidad especificada, deben realizarse los ensayos correspondientes sobre muestras representativas de los materiales de la construcción. La autoridad competente tiene el derecho de ordenar el ensayo de cualquier material empleado en las obras de concreto, con el fin de determinar si corresponde a la calidad especificada”* [13].

La NSR-10, específicamente en su título C, precisa los requerimientos con respecto al diseño estructural de elementos de concreto. Allí se determinan las normas que deben cumplir tanto el concreto como los materiales con los que éste se fabrique [13]. Éstas normas son las Normas Técnicas Colombianas (NTC) o su equivalente americano *American Society for Testing and Materials (ASTM)*.

Para el control de cementos Pórtland se deben cumplir las NTC121 y NTC321 (ambas corresponden a la ASTM C150). Adicionalmente, para las adiciones y los materiales suplementarios en la preparación de concreto, se deben cumplir normativas aplicables para los distintos casos.

6.2.1 Cenizas volantes

Con el fin de determinar la calidad de la ceniza es necesario llevar al laboratorio muestras para hacer una caracterización completa del material. Posteriormente, es necesario evaluar la reactividad de la ceniza con el cemento con el fin de conocer su capacidad cementante. Adicionalmente, las cenizas volantes no podrán contener elementos perjudiciales en cantidades tales que puedan afectar a la durabilidad y calidad del concreto o causar fenómenos de corrosión de las armaduras.

Este control de calidad de las cenizas *“debe ser periódico, pues su calidad cambia de acuerdo con las características del carbón mineral extraído de las minas”*, afirma el investigador Caballero Badillo [34].

Para las cenizas volantes suministradas a granel deben emplearse equipos similares a los utilizados para el cemento, almacenando el material en recipientes y silos impermeables que las protejan de la humedad y de la contaminación, los cuales deben estar identificados para evitar errores de dosificación; lo anterior debido a la sensibilidad que tiene éste tipo de material.

Las cenizas volantes utilizadas en el concreto deben tener conformidad con la norma ASTM C618. O su equivalente para Colombia, NTC 3493. En la tabla 2 se presentan los requisitos que la norma plantea:

Tabla 2. Requisitos para las cenizas volantes. NTC3493

CLASE	F	C
Fuente más común	Carbones bituminosos o Antracita	Carbones sub-bituminosos o Lignito
CaO	---	Mín. 10%
SiO₂+ Al₂O₃	Mín.70%	Mín. 50%
SO₃	Mín. 5%	Mín. 5%
Humedad	Máx. 3%	Máx. 3%
Inquemados¹	Máx. 6% (hasta Máx. 12% ²)	Máx. 6%
Ret. en Tamiz 45 µm	Máx.34%	Máx. 34%
Indice Actividad	Mín. 75% a 7 y 28 días	Mín. 75% a 7 y 28 días
¹ Pérdidas por ignición		
² Si resultados de laboratorio muestran desempeño aceptable		

6.2.2 Escoria de alto horno

Las escorias molidas de alto horno utilizadas como un material cementante deben tener conformidad con la norma ASTM C989, o su equivalente para Colombia, NTC 4018.

En la especificación mencionada se definen tres grados de escorias: 80, 100 y 120, donde el grado más alto contribuye más a la resistencia potencial. Las escorias molidas de alto horno tienen por sí mismas propiedades cementantes pero éstas son mejoradas cuando se utilizan con cemento Pórtland [51]. En la tabla 3 se describen las especificaciones para las escorias según su grado.

Tabla 3. Requisitos para las escoria de alto horno. NTC 4018

REQUISITOS	GRADO		
	80	100	120
Ión Sulfuro (S)	Máx. 2.5%	Máx. 2.5%	Máx. 2.5%
SO ₃	Máx. 4%	Máx. 4%	Máx. 4%
Ret. Tamiz 45 µm	0,2	0,2	0.2
Índice de Actividad a 7 días	---	Mín. 75%	Mín. 95%
Índice de Actividad a 28 días	Mín. 75%	Mín. 95%	Mín. 115%

6.2.3 Micro sílice

El humo de sílice se prueba en un análisis químico completo y de distribución de tamaño de partícula. La norma para el humo de sílice es la ASTM C1240 o su equivalente para Colombia, NTC 4637, la norma determina cuáles son las especificaciones para su uso en concreto y en sistemas que contienen cemento hidráulico, adicionalmente determina los ensayos necesarios para conocer la proveniencia del material.

Los requisitos fundamentales de la norma se expresan en la tabla 4:

Tabla 4. Requisitos para el humo de sílice. NTC 4637

REQUISITOS	Valor/Rango especificado
Contenido de SiO ₂	Mín. 85%
Humedad	Máx. 3%
Perdida por ignición	Máx. 6%
Ret. en Tamiz 45 µm	Máx. 10%
Índice de Actividad a 7 días	Mín. 105%
Superficie específica	Mín. 15 m ² /g

6.2.4 Puzolanas artificiales

Al igual que en las cenizas volantes, el control sobre las puzolanas artificiales que se adicionen al concreto deben tener conformidad con la norma ASTM C-618 o su equivalente colombiana, la NTC 3493. Ésta abarca el uso de la ceniza volante, la puzolana natural o la adición mineral al concreto y los diferentes materiales con propiedades puzolánicas que se puedan obtener en la industria.

6.2.5 Agregados reciclados

La resistencia del concreto es afectada por uno de sus componentes básicos: el agregado grueso. Por esto se hace necesario determinar las propiedades del material reciclado que se vaya a utilizar con éste fin, para lo cual es necesario realizar un análisis detallado de las características del agregado y su comportamiento en el concreto.

Dado el origen del agregado alternativo, es necesario conocer la morfología de las partículas, pues esta característica tiene gran influencia en las propiedades del concreto, en estado fresco o endurecido. El estudio morfológico debe determinar propiedades como el tamaño de partícula, la redondez o esfericidad y la presencia de sustancias perjudiciales que afectan el comportamiento del concreto [47].

Un factor esencial a considerar en la admisión y aceptación del agregado reciclado, es la verificación de la ausencia de contaminantes (materia orgánica, hierro, etc.) ya que algunos tienen una influencia negativa en la calidad de los productos finales.

Indiferente de su proveniencia, el agregado reciclado debe cumplir con las NTC y la NSR-10 que se refieran a las propiedades y comportamiento de los agregados finos y/o gruesos, dependiendo del uso que se dé al material y su grado de trituración; ensayos que van desde la absorción del agregado hasta la granulometría del mismo.

6.3 CONCRETO EMPLEADO EN SISTEMAS INDUSTRIALIZADOS PARA VIVIENDAS DE MUROS DE CONCRETO

En los sistemas industrializados de vivienda de muros de concreto se requieren dos tipos de mezclas dependiendo si son usadas para los muros o para las losas. En particular, los criterios de diseño de las mezclas de concreto usadas para los muros están asociados con la fluidez y los tiempos de fraguado debido a la alta resistencia al bloqueo que se presenta al interior de los muros (espesores entre 8 y 12 cm) generada por la presencia de tuberías,

refuerzos de acero y accesorios. Por su parte la principal característica que se busca en las mezclas usadas en las losas de concreto está asociada con la resistencia a edades tempranas sin perder de vista la fisuración plástica [18].

Las características mencionadas anteriormente han evolucionado desde los primeros años de la década de los 90's cuando se introdujo al país el sistema *Outinord* y el *Contech*. En los primeros años de esta década se empleaba un único tipo de concreto que cumplía con las características necesarias tanto para losas como para muros [10]. Sin embargo, es claro que el uso de un único tipo de mezcla de concreto no garantiza un óptimo aprovechamiento de las propiedades físico-químicas y mecánicas de cada componente en la mezcla de concreto, por los requerimientos específicos de cada proyecto o etapa del mismo. En la tabla 5 se presentan unas especificaciones básicas para la preparación de las mezclas de concreto, tanto para losas como para muros.

El concreto usado en los muros estructurales de sistemas industrializados ha evolucionado desde mezclas fluidas con asentamientos de 7" (17,5 cm) hasta los concretos autocompactables que no requieren vibrador de inmersión y que garantizan un adecuado llenado en todos los espacios al interior de los muros.

Tabla 5. Especificaciones concreto en sistemas industrializados, CEMEX-2003

CRITERIOS DE DISEÑO	MUROS	LOSA
Fluidez	Alta	Media
Tamaño máx. agregado	Grava fina	Grava gruesa
	(19 mm)	(25 mm)
Resistencia inicial	Media	Alta
Tiempos de fraguado	Acelerado	Acelerado
Resistencia final (f'c)	Min. 21 Mpa	Min. 21 Mpa
	a los 28 días	a los 28 días
Riesgo de fisuración plástica temprana	Bajo	Alto

En la construcción de proyectos de vivienda de 1 y 2 pisos, la resistencia es un factor importante, al igual que en todos los proyectos de construcción, aunque las cargas sean pequeñas, sin embargo existen otros elementos fundamentales como lo son el costo y el tiempo de la construcción, especialmente por las características diferenciadas en la industria de la construcción de viviendas y especialmente de interés social.

La industrialización de estructuras ejecutadas “in situ” se consigue empleando mesas de encofrado para forjados o losas y paneles de encofrado para muros, ya que permite una estandarización y rotación programable y controlable. Asimismo, para incrementar la productividad y la calidad, en ocasiones, se incluyen aditivos con la finalidad de acelerar el desencofrado [50].

6.4 PROPIEDADES DEL CONCRETO CON LA INCLUSIÓN DE COMPONENTES ALTERNATIVOS

La implementación de componentes alternativos al concreto, especialmente materiales cementantes suplementarios, puede realizarse a través de la mezcla con el clinker de cemento para producir cemento combinado, o pueden incluirse a la mezcla de concreto como agente complementario.

Con el uso de componentes alternativos o suplementarios en el concreto se busca la optimización en factores económicos y/o técnicos. En el campo técnico, con la implementación de materiales alternativos a los convencionales, se pueden variar propiedades del concreto tanto en estado fresco como endurecido. Éstos materiales modifican propiedades como la durabilidad, la trabajabilidad, la resistencia, entre otras.

Los componentes alternativos para el concreto, especialmente aquellos que poseen propiedades cementantes poseen, en su composición química, un alto contenido de sílice que al combinarse con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ libre, producto de la hidratación del cemento, forman nuevos silicatos y/o aluminatos que son los responsables de la resistencia mecánica de la pasta. Del mismo modo, se observa que se genera una alta reactividad en la pasta del concreto como consecuencia de la alta fase amorfa (o más baja cristalina) de los minerales que forman la adición y de la finura característica de estos materiales cementantes suplementarios [52].

El comportamiento de los componentes alternativos en el concreto está muy relacionado con la naturaleza de la adición. Consideraciones económicas y ambientales han acelerado el uso de este tipo de materiales como componentes alternativos para el concreto o como combinación para el cemento Pórtland. La selección de cada material complementario y la

proporción de su uso es función del tipo, características y costo del concreto que se busca. [50].

La mayoría de los efectos de los materiales cementantes alternativos en las propiedades del concreto tienden, generalmente, a mejorar el rendimiento concreto. Éste tipo de inclusiones en el concreto afecta a sus propiedades tanto en estado fresco como endurecido. La naturaleza y el grado de impacto en una propiedad específica del concreto depende de varios factores como el tipo y la cantidad de adición, la proporción de mezcla, los aditivos químicos, las condiciones de curado, y otras condiciones de trabajo, incluyendo las prácticas constructivas [53].

6.4.1 Concreto con cenizas volantes

La ceniza volante es una puzolana importante, que tiene una serie de ventajas en comparación con el cemento Pórtland ordinario, que hacen que se plantee este sub-producto industrial como una alternativa aceptable para su inclusión en el concreto.

Las cenizas causan, en general, una reducción de la cantidad de agua necesaria para conseguir una buena trabajabilidad, hecho que se debe posiblemente a que la finura y la forma esférica de las cenizas son consideradas las dos características que más influyen en las propiedades reológicas de las pastas de concreto. En este sentido, algunos estudios han determinado que las cenizas volantes pueden llegar a ser dos veces más efectivas que el cemento en cuanto al mejoramiento de la trabajabilidad y, por consiguiente, de las aptitudes para el bombeo [54].

A partir de la inclusión de cenizas volantes en el concreto, se obtiene un mayor tiempo de fraguado [54]. Ésta propiedad del concreto, que se establece en la transición de la consistencia fluida a la sólida, está en función de la finura y la composición química de los materiales cementantes, además de la cantidad de ceniza incluida. El mayor tiempo de fraguado se convierte en una ventaja cuando se advierte el bloqueo causado por las tuberías y demás accesorios que deban incluirse en la estructura. Sin embargo, al presentar la mezcla un mayor tiempo de fraguado, se genera una desventaja, considerando otra de las especificaciones necesarias en los sistemas industrializados, ya que lo que se pretende es que el concreto sea capaz de soportar cargas a edades tempranas durante el proceso de fraguado, para permitir el avance rápido en la obra.

En la construcción industrializada donde se plantean métodos de construcción más técnicos y prácticos, se percibe la necesidad de recurrir a las mixers o camiones mezcladores que permitan la disposición del concreto premezclado, así como unas

condiciones particulares que permitan su bombeo de manera adecuada y controlada. La adición de cenizas como componente alternativo, genera un concreto más cohesivo y con menos tendencia a la segregación y exudación. Además, debido a la forma esférica de las partículas de las cenizas se disminuye la fricción entre los agregados y entre el concreto y la tubería, alcanzando una mayor calidad [54].

Una de las propiedades que mayor cambio presenta con la adición de cenizas volantes es el calor de hidratación, que para la mezcla resultante es menor que el presentado en el concreto convencional, lo que convierte a este sub-producto en un subproducto conveniente, especialmente, en la construcción en estructuras masivas donde se pueden presentar grandes cambios debido al aumento de la temperatura y consecuentemente se puede generar fisuración [54]. Si para un proyecto cualquiera el desarrollo de la resistencia normal del concreto es crítico, se puede disponer de aditivos para acelerar las tasas de hidratación de la de la mezcla de concreto con cenizas volantes.

Por medio de la actividad puzolánica, las cenizas volantes se combinan químicamente con agua formando componentes cementantes adicionales que producen un concreto más denso y con mayor resistencia. Al mismo tiempo, la reacción química reduce la cantidad de cal susceptible de ser atacada por ácidos débiles, sales o sulfatos. La densidad del concreto se aumenta por las pequeñas y finas partículas de cenizas volantes que actúan como micro-áridos que pueden llenar los espacios más pequeños del concreto. Las cenizas volantes generan un efecto lubricante que disminuye la cantidad de agua demandada (del 2 al 10%); esta reducción disminuye la proporción de vacíos internos [54].

El concreto producido con cenizas volantes puede tener mejores propiedades de resistencia y durabilidad que el concreto producido convencionalmente, aunque el ritmo relativamente lento de desarrollo de la resistencia de concreto con cenizas volantes es una desventaja en aplicaciones donde se requiere alta resistencia temprana [55], como es el caso del vaciado de losas mediante formaletería rotativa. En la construcción industrializada esto sería un gran revés, puesto que la productividad depende en gran parte de la rápida rotación de la formaletería, por lo que se puede recurrir a aditivos, como se mencionó anteriormente. Sin embargo en muchas situaciones y proyectos, especialmente en estructuras donde existen grandes masas de concreto, como presas y fundaciones grandes, que no se cargan a sus valores de diseño hasta meses o incluso años después de su vaciado, es muy común especificar la resistencia a los 90 días en lugar de los convencionales 28 días [55].

6.4.2 Concreto con escoria de alto horno

Las propiedades cementantes de la escoria de alto horno se conocen desde hace algún tiempo. Desde la década de 1950, el uso de escoria de alto horno como un material cementante se ha hecho extensivo en muchos países. Debido a sus propiedades favorables en general, la escoria no sólo es utilizada como reemplazo parcial de cemento Pórtland, sino también como agregado. Al igual que las cenizas volantes, la escoria de alto horno mejora las propiedades mecánicas, la durabilidad del concreto y genera un menor calor de hidratación [56].

Por su composición química Calcárea, Silíceo y Aluminosa, similar a la del clinker Pórtland, la escoria de alto horno es uno de los componentes alternativos con mayor potencial en cuanto a su implementación en el concreto como adición para diversas aplicaciones en la ingeniería.

El concreto adicionado con escoria de alto horno posee unas características superiores con respecto al concreto con materiales convencionales, en factores como la trabajabilidad de la mezcla, permitiendo que el vaciado y la compactación sean más fáciles. Con la inclusión de escoria se obtiene un menor incremento de temperatura a edades tempranas, un aspecto fundamental para la reducción del riesgo de fisuras térmicas. Asimismo, se logra una alta resistencia ante el ataque de sulfatos y otros productos químicos, que reduce el riesgo de corrosión en las armaduras de acero [57].

Al implementar la escoria como material suplementario, se logran desarrollos en la durabilidad del concreto, esto en función del porcentaje de inclusión, para lo cual aplica que, entre mayor sea el porcentaje de escoria, mayor será la durabilidad del concreto. La desventaja del nivel de reemplazo más alto es que el desarrollo de la resistencia a temprana edad es más lento que en el concreto sin adiciones [57].

Las mezclas de concreto que contienen escorias de alto horno, que están correctamente diseñadas, han demostrado que mejoran la trabajabilidad, de igual modo conlleva a la obtención de mejores acabados en los elementos cuando se compara resultados obtenidos con concretos fabricados netamente con cemento Pórtland. Lo anterior es debido a varios factores tales como la cohesión de la pasta y la baja absorción inicial. En este sentido, se aprecia que los concretos con escorias presentan un mayor asentamiento [57]. Ésta cualidad ofrece ventajas cuando se relaciona con la construcción industrializada de viviendas con muros de concreto de pequeños espesores.

El uso de escoria en el concreto reduce significativamente el riesgo de deterioro que se produce por la reacción álcali-sílice, proporciona una mayor resistencia a la entrada de cloruros, reduciendo el riesgo de corrosión de la armadura de acero, y provee una mayor resistencia al ataque de sulfato y otros químicos [58].

6.4.3 Concreto con micro sílice

El micro sílice puede tener aplicaciones como material puzolánico y como material de filler (llenante). El micro sílice, como filler, trabaja llenando los espacios entre las partículas de cemento reduciendo los vacíos en el concreto fresco. Sus partículas proveen al concreto mayor adherencia, adicionalmente incrementan la fluidez de la mezcla permitiendo que el concreto fluya más fácilmente al aplicarle energía. Esto puede lograrse reduciendo el contenido de cemento y empleando el micro sílice para elevar la resistencia debido a su eficiencia cementante. Otra manera es usar un alto porcentaje de otro material puzolánico de reemplazo y emplear la reactividad del micro sílice para dar resistencia en etapa temprana e impermeabilidad, permitiendo así que los materiales más lentos trabajen en un período mucho más largo de tiempo [59].

Este material síliceo mejora la resistencia y la durabilidad del concreto. Existe una considerable cantidad de literatura disponible que documenta los beneficios del humo de sílice tanto como puzolana y como filler. A pesar de que el material es difícil de manejar debido a su extrema finura, sus beneficios son tan evidentes que su costo excede el del cemento considerablemente. De hecho, ahora está disponible no sólo como un subproducto industrial, sino también se produce específicamente para la industria del concreto [59]. Con la inclusión de micro sílice se mejoran propiedades como el bombeo, adicionalmente se reducen o eliminan la segregación y el drenado, lo que permite lograr acabados en la superficie más pronto que con el concreto normal [60], generando una gran ventaja para los sistemas constructivos industriales y las viviendas de interés social, las cuales se entregan con el mínimo de acabados.

Debido a que las partículas de micro sílice son ultrafinas, con un área de superficie específica de alrededor de 20,000 m²/kg y un contenido de SiO₂ de aproximadamente 90%, la reactividad es muy alta. Por el tamaño fino de las partículas del micro de sílice, la estructura cristalina formada por esta reacción es también muy pequeña por lo que se ocupan los espacios vacíos dentro de la matriz del concreto, lo cual densifica la estructura completa del concreto, resultando en una resistencia mayor y reducciones significativas en permeabilidad [61].

En cuanto a la resistencia a la compresión del concreto adicionado con micro sílice, se han registrado resistencias de más de 100 MPa, obviamente, utilizando una mezcla con aditivos especiales. El efecto sobre la permeabilidad es aún más pronunciado. Cuando se usa un 10% de dosis en una mezcla que contiene alrededor de 400 kg de cemento, el coeficiente de permeabilidad se puede reducir hasta 1/100 del nivel del concreto equivalente sin micro sílice. Este incremento en resistencia y la reducción en permeabilidad del concreto, combinados con la reducción de hidróxido de calcio, significan que las características de durabilidad del concreto se ven enormemente mejoradas [62].

Las resistencias al ataque de sulfato y cloruro se incrementa, la susceptibilidad a la reacción álcali sílice se elimina virtualmente. De igual modo la adherencia se fortalece así como la resistencia a la abrasión y erosión, esto al confrontar un concreto con micro sílice un concreto ordinario [62].

6.4.4 Concreto con puzolanas artificiales

Las puzolanas artificiales tienen su origen en cenizas de residuos agrícolas, ya que cuando son incinerados en las condiciones adecuadas alcanzan propiedades puzolánicas, con un alto contenido de sílice y alúmina, elementos que son esenciales en la reactividad que pueden alcanzar los materiales al combinarse con el cemento Pórtland para fabricar concreto [63].

Las puzolanas artificiales tiene el potencial de ser utilizadas como alternativa para el uso que actualmente se da al humo de sílice con un costo mucho más bajo, con propiedades análogas, sin comprometer la calidad. Agregar ceniza proveniente de la cascarilla de arroz o del bagazo de caña a la mezcla de concreto mejora la trabajabilidad, la resistencia e impermeabilidad de las mezclas de concreto, al tiempo que se obtiene un concreto resistente a los ataques químicos, abrasión y corrosión de las armaduras metálicas además de disminuir la permeabilidad.

Las propiedades que se alcanzan al adicionar ceniza de cascarilla de arroz se pueden explicar por los efectos químicos y físicos generados por la misma. Los efectos químicos son debidos a las reacciones puzolánicas que se generan al mezclar el material con cemento y agua. Los efectos físicos se deben al efecto de filler al reducir los vacíos entre las partículas de cemento y los agregados. Sin embargo, como consecuencia del mayor tamaño, superficie específica y porosidad de las cenizas de la cascarilla de arroz, con relación al cemento Pórtland, se hace necesario un mayor contenido de agua en la mezcla de concreto lo que lleva a tener una menor resistencia a la compresión con respecto al

concreto convencional; razón por la cual, según las necesidades del proyecto, es preciso utilizar superplastificantes [63].

6.4.5 Concreto con agregados reciclados

La sustitución de agregados naturales por reciclados, trae consigo un cambio en algunas propiedades del concreto debido a la constitución del mismo material reciclado y a la variabilidad del componente como consecuencia de la diversa calidad y origen y de los escombros.

En gran parte de las investigaciones que se han registrado se manifiesta que, independientemente del tipo de concreto del cual proviene el árido reciclado, la trabajabilidad del concreto resultante es baja en comparación con el concreto convencional. Esto puede ser debido a la alta capacidad de absorción y a la superficie rugosa de los áridos reciclados. También se expone que en este tipo de concretos, se hace necesario la utilización de súper plastificantes para mantener un asentamiento entre 50 y 60 mm. Esto indica que la absorción de agua es más alta para concretos con áridos procedentes del reciclaje de concreto [64].

Según un estudio realizado por Martínez y Mendoza [65], los concretos con agregados reciclados tienen mayores resistencias respecto a los naturales para una misma relación agua-cemento. Es por esto que hay que tomar en cuenta que los concretos reciclados requieren de mayores consumos de agua que los naturales para alcanzar asentamientos similares como consecuencia de su alta absorción.

En el estudio mencionado, si se relaciona el consumo de cemento con la resistencia a la compresión obtenida, se puede observar que cuando se tiene un consumo de hasta 300 kg/m³ de cemento, la calidad en los concretos reciclados es mayor que en los naturales, mientras que para consumos mayores a 300 kg/m³ la calidad es mayor para los concretos naturales, aunque las diferencias son pequeñas

6.5 DISPONIBILIDAD DE LOS COMPONENTES ALTERNATIVOS

Como parte de la concepción de la sostenibilidad en el desarrollo, en la actualidad se presenta un auge en la búsqueda de la recuperación y reutilización de elementos que son considerados residuos o desechos. Es por esto que en la industria se han percibido alternativas que pueden, a través de un proceso de investigación y desarrollo adecuados,

ser implementados como solución a diferentes necesidades, inclusive a las percibidas en la industria de la construcción.

En ésta búsqueda se ha encontrado que desde la industria se pueden obtener subproductos que poseen características similares al cemento o que complementan sus propiedades -en especial para la fabricación de concreto- además de residuos con aplicaciones ingenieriles, que de otra manera serían desechados o dispuestos en rellenos y que causarían un gran impacto ambiental. Es por esto que la sustitución del cemento por éste tipo de materiales ofrece variadas ventajas en aspectos técnicos, económicos y ambientales

Aunque existen investigaciones y desarrollos sobre materiales alternativos para las diversas industrias en el mundo, cada desarrollo debe considerar y adaptarse a las circunstancias y características de las distintas regiones. Como consecuencia, se plantea que la adaptabilidad de alternativas está sujeta a consideraciones particulares como la disponibilidad, condición que para algunos está inherente a otras actividades industriales, pues el material alternativo se obtiene como subproducto, mientras que para otros casos es necesario emprender un proceso productivo, razón por la cual algunos de los componentes alternativos no están disponibles comercialmente.

A continuación se trata el tema de disponibilidad para los diferentes componentes alternativos y las variables que rodean su implementación.

6.5.1 Cenizas volantes

En el pasado las cenizas volantes producidas por la combustión del carbón eran simplemente arrastradas junto con los gases de combustión y se dispersaban en la atmósfera. Esta situación creó preocupaciones ambientales y de salud que han ido impulsando la legislación hacia la reducción de las emisiones de ceniza volante a menos del 1 por ciento de la ceniza producida. A nivel mundial, más del 65% de cenizas volantes producidas a partir de centrales eléctricas de carbón se dispone en rellenos sanitarios y en depósitos de cenizas [66].

Según datos de ECOBA (European Coal Combustion Products Association) a nivel mundial el mayor productor de cenizas volantes es China, en segundo lugar Rusia y en tercer lugar E.E.U.U. La producción de cenizas volantes de la combustión del carbón en E.E.U.U. y Unión Europea se estima en 88 y 55 millones de toneladas por año respectivamente. De esta producción, un porcentaje muy bajo es reciclado, 22% en E.E.U.U. y en promedio solo el 50% en la Unión Europea, presentándose grandes diferencias entre un país y otro [66].

La situación es diferente en Holanda, en donde se recicla el 100% de la producción. Además, un estudio de mercado realizado por PROGRES (Programme of Research on the Service Economy) en 1997, indicó que en Holanda el mercado potencial en los sectores mencionados de nuevos productos derivados de las cenizas volantes, sin incluir las aplicaciones convencionales, para el año 1997 era de 175,000 Ton/año, lo que implica el aprovechamiento de más del 20% de los residuos producidos para ese mismo año, un mercado que ha ido en aumento. Asimismo, se concluyó que los beneficios económicos esperados de los diferentes subproductos se podían estimar entre 20 y 40 EUR por tonelada (5 MEUR/año), sin considerar el beneficio ambiental y la pérdida que representaría si los residuos no fueran utilizados apropiadamente o subvalorados [66].

A nivel local, específicamente en Antioquia, según un estudio realizado por el Centro de Investigaciones del Carbón en 1996 para 25 empresas consumidoras de carbón, el consumo anual de carbón es de 406.602 toneladas, del cual se producen aproximadamente 26.852 toneladas de cenizas volantes, con una cantidad de inquemados de 4.852 toneladas. El crecimiento del consumo de carbón en Colombia y en la región, se ha tasado en 8% anual, lo que proyectaría para el 2010 un consumo de 2 a 3 veces superior al del año del estudio. En la Tabla 6 se presenta el consumo de carbón, producción de cenizas volantes y porcentaje de inquemados en Antioquia y zonas de influencia [67].

Con base en las cifras presentadas en la Tabla 6 y en la vocación industrial de la región en expansión, como punto de partida, se puede prever un crecimiento descontrolado y con un gran impacto ambiental si no se toman las medidas de control necesarias y no se promueven políticas con el fin de impulsar la reutilización de los residuos.

A pesar del desarrollo de tecnología para evitar, mitigar y controlar este tipo de emisiones y poder cumplir con la normatividad al respecto, la generación de estas cenizas sigue suscitando problemas de manejo y disposición, ya que si se acumulan, pueden llegar a convertirse en una amenaza ambiental y simultáneamente en un problema económico.

El uso de las cenizas volantes como subproducto en otras industrias puede contribuir al alivio del problema de disposición y por ende menguar el impacto ambiental que originan las mismas. No obstante, el alto contenido de inquemados -carbón que no alcanza a consumirse totalmente en la combustión- limita su utilización ya que se califican como de baja calidad para uso en el ramo de la construcción [68].

Tabla 6. Consumo de carbón. Centro Investigaciones del Carbón-UNAL Medellín, 1996.

EMPRESAS	Consumo Carbón	Producción C.V	Inquemados	
	ton/año	ton/año	%	ton/año
Alimentos Copelia	36	0,72	70,98	0,51
Coloidales S.A	420	8,40	31,13	2,61
Creaciones M.Blanco	900	18,00	23,24	4,18
Hinestrosa y Cia.	960	19,20	33,09	6,35
Laboratorio Higietex	240	4,80	29,42	1,41
Lavandería los Trajes	600	12,00	16,69	2,00
Minerales Industriales	960	19,20	44,15	8,48
Súper Alimentos	360	7,20	48,19	3,47
Tintorería y L. Espumar	480	9,60	47,66	4,58
Tintorería Mil Colores	558	11,16	41,84	4,67
Tintorería T.P.Q	432	8,64	29,53	2,55
Bavaria (Manizales)	4320	86,40	23,56	20,36
Bavaria (Pereira)	4800	96,00	41,06	39,42
Colombiana Kimberly	4320	86,40	12,19	10,53
Fatelares S.A	1332	26,64	23,95	6,38
Lavamoda Ltda	1704	34,08	27,75	9,46
Pasabocas Margarita	1440	28,80	22,3	6,42
Teñidos y Acabados	1680	33,60	24,78	8,33
Tintorería Servicolor	3600	72,00	29,53	21,26
Cervecería Unión S.A	14160	283,20	19,2	54,37
Coltejer S.A	204000	16320,00	23,49	3833,57
Fabricato S.A	108000	8640,00	5,47	472,61
Gravetal S.A	10260	205,20	23,23	47,67
Productos Familia	12240	244,80	14,34	35,10
Textiles Rionegro	28800	576,00	42,67	245,78

6.5.2 Escoria de alto horno

A partir de la fabricación de cada tonelada de acero, se calcula que aproximadamente se generan de 110 a 150 kg de escoria negra y de 20 a 30 kg de escoria blanca, es decir, aproximadamente un 15% de la producción de acero se convierte en escoria [69].

Según cifras de la Cámara Fedemetal de la Andi, el consumo de acero en Colombia, para el 2007, superó los 3 millones de toneladas, lo que lleva a inferir que la generación de escorias en Colombia para ese año debe ser cercana a los 500 mil kilogramos. En tanto que para 2006, en EE.UU se calcula que se alcanzaron a producir 8,6 millones de toneladas de escorias siderúrgicas.

De acuerdo con la proyección de la demanda mundial, la Asociación Mundial del Acero estima que ésta alcanzará un récord de 1.441 millones de toneladas en 2012, señalando que el mayor crecimiento se presentará en los países emergentes, entre los que se encuentra Colombia.

Otra de las industrias siderúrgicas que tienen relevancia en el país, es la industria del ferroníquel, que tiene su base de producción en el departamento de Córdoba con la compañía Cerro Matoso, segundo productor mundial de ferroníquel. La producción para esta compañía, según el Ministerio de Minas y Energía, se espera que supere las 51.400 toneladas.

En la actualidad existen aproximadamente 22,9 millones de toneladas de Escoria proveniente de Cerro Matoso en los botaderos, las cuales serán reprocesadas conjuntamente con los nuevos residuos que se continúen produciendo en los hornos eléctricos [70].

6.5.3 Micro sílice

Como se mencionó previamente, el micro sílice se genera a partir de la reducción de cuarzo de alta pureza en los hornos de arco eléctrico, principalmente en la producción de aleaciones de silicio y ferrosilicio.

En E.E.U.U. la *Silica Fume Association* (SFA) estima que la producción de micro sílice en el año 2004 se encontraba entre las 110,000 y 132,000 toneladas. Asimismo, la SFA estima que en 2004 cerca de 28,000 toneladas de micro sílice fueron dispuestas en rellenos. Dadas las ventajas que demuestra el micro sílice, no es claro porque se presenta

esta disposición del subproducto; las posibles razones incluyen contaminación en el material o falta de acceso al mercado debido a la localización de los hornos.

Así como existen compañías que compran el micro sílice como subproducto y la tratan para revenderla, también hay compañías que se dedican netamente a la producción de este tipo de materia prima con destinación hacia la industria de la construcción. En Colombia, las empresas productoras de humo de sílice o micro sílice son principalmente SIKA, TOXEMENT y medianamente con BASF QUIMICA. Estas compañías han jugado un papel importante en el desarrollo y promoción de las adiciones y aditivos para el sector constructor, además han tenido un dominio de este mercado.

En Colombia existen productos similares y sustitutos del micro sílice con productos como: Sikacrete-Hd, Eucomicrosílica, harina de sílice 9000-Ka, Microsílice Arciresa, Microsilex. Estos productos poseen diferente concentración de sílice, composición química y pesos específicos [71].

6.5.4 Puzolanas artificiales

6.5.4.1 Ceniza de cascarilla de arroz

La ceniza de cascarilla de arroz es un material de desecho agrícola que representa alrededor del 20% de la producción, lo que implica que por cada tonelada de arroz producida se generan aproximadamente 200 kg de cascarilla que al ser procesada, mediante combustión, origina 40 kg de ceniza con un contenido del orden del 90% en sílice, es decir, la ceniza de cascarilla puede representar un 4% de la producción total de arroz, esto en caso de ser procesada para tal fin.

De esta cascarilla de arroz sólo a una pequeña proporción se le está dando provecho: para la limpieza de los campos en los procesos de preparación y con objeto de reducir el volumen de residuos generados, se vienen recurriendo a procesos tales como el de combustión a campo abierto o a la disposición del material sin ningún protocolo adecuado, conduciendo a problemas de carácter ambiental [72].

Según el MinAgricultura (2006), en Colombia, el arroz es el tercer producto agrícola en extensión, después del café y el maíz. Representa el 13% del área cosechada y el 30% de los cultivos transitorios. Su producción representa el 6% del valor de la producción agropecuaria y el 10% de la actividad agrícola Colombiana. El valor generado por este producto es equivalente al 58% del valor constituido por el cultivo del café. En Antioquia,

para el 2003 se alcanzó una producción de arroz de 47.366 toneladas en un área sembrada de 15.438 hectáreas con una participación del 1.9% de la producción nacional.

Por las cifras expuestas anteriormente, y por la poca vocación de las tierras en Antioquia para el arroz, se percibe una limitante en cuanto a la implementación de la ceniza derivada de este producto agrícola en la industria de la construcción para proyectos de vivienda de interés social. No obstante, se puede acotar que la implementación se podría dar a pequeña escala particularmente en las zonas de producción. Esto abre la posibilidad en las zonas rurales, en las cuales se hace difícil y costoso el transporte de material para la construcción, de generar una alternativa para la construcción de vivienda digna que permita suplir esta necesidad fundamental de un sector de la población.

6.5.4.2 *Ceniza del bagazo de caña de azúcar*

Según cifras de la *Food and Agriculture Organization* (FAO) de la *Organización de Naciones Unidas* (ONU), 25 países en el mundo producen panela, y Colombia es el segundo productor después de la India. Para el período 1998–2002, la India concentró el 86% de la producción mundial, mientras que Colombia cerca del 13,9%; es evidente por tanto que la producción mundial de panela se concentra en estos dos países.

En Colombia, los mayores productores de panela son Boyacá, Santander, Cundinamarca, Antioquia, Huila y Nariño, departamentos cuya producción aporta tres cuartas partes al total nacional. Los rendimientos obtenidos por hectárea son heterogéneos a causa de las diferencias entre diversos contextos socioeconómicos y tecnológicos en que se desarrolla la producción. Los mayores rendimientos se alcanzan en la región de la Hoya del río Suárez (ubicada en los departamentos de Boyacá y Santander), puesto que allí se ha logrado el mayor desarrollo tecnológico, tanto en el cultivo como en el procesamiento de la caña panelera. El cultivo de la caña y la producción de panela son las actividades agrícolas primordiales en la economía nacional, entre otras razones por su significativa participación en el producto interno bruto (PIB) agrícola, la superficie dedicada al cultivo de la caña, la generación de empleo rural y su indiscutible importancia en la dieta de los colombianos. En 1998 la producción panelera se valoró en cerca de 7 mil millones de pesos (en el orden de 350 millones de dólares) y aportó con 7,3% a la formación del PIB agrícola. En cuanto al contexto de la agroindustria rural, la elaboración de panela es de gran importancia por el número de trapiches y por la cantidad de mano de obra vinculada [73].

En el país se estima que existen cerca de 70.000 unidades agrícolas que cultivan caña panelera y aproximadamente 15.000 trapiches en los que se elabora panela y miel de caña [73]. Son datos que llevan considerar la posible implementación de hornos para la

combustión de cenizas en cada zona donde se produzca caña en cantidades considerables, lo que sería una alternativa que admite la consideración por parte de los entes gubernamentales, pues es partir de éstos que se puede facilitar la promoción de alternativas para el desarrollo de las regiones, en materia de vivienda y trabajo.

En la actualidad, en la mayoría de los casos, la disposición del bagazo se hace almacenándolo en cobertizos llamados bagaceras, como éste sub-producto posee una humedad cercana al 60%, se almacena hasta que alcance una humedad inferior al 30%, para luego ser utilizado como combustible en las hornillas para la producción de panela [73].

6.5.5 Agregados reciclados

El problema del manejo y disposición de escombros de la industria de la construcción plantea grandes retos en materia de innovación, sostenibilidad ambiental y logística. La magnitud del problema es tal, que sólo en E.E.U.U al año se generan alrededor de 200 a 300 millones de toneladas de escombros mientras que, según el *Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos del Valle de Aburra* (PGIRS) elaborado en 2006, se estima que en éste Valle se producen más de 8.000 toneladas diarias de escombros, teniendo en cuenta que sólo Medellín aporta cerca de 7.000 toneladas diarias [74].

Los residuos originados en los nuevos proyectos de construcción, demoliciones y obras de reparación o reforma no son homogéneos, pero, en términos generales, de acuerdo con el PGIRS, se presenta que para la región los escombros generados contienen más del 70% de materiales inertes, de origen mineral, que pueden reciclarse como áridos para distintos usos. Otro tipo de materiales que se encuentran en los residuos de construcción son tierra, papel, cartón, madera, hierro, aluminio, vidrio, plásticos, envases y embalajes, entre otros; y algunos tóxicos y peligrosos, entre los que se encuentran barnices, material aislante, pinturas, metales pesados, disolventes, siliconas, aunque en cantidades menores.

En el PGIRS, se tasa que para Valle de Aburrá por cada metro cuadrado de construcción de vivienda, se generan 1,35 m³ de escombros, de los cuales entre el 50 y el 70 % son eventualmente reciclables. Además, se ha estimado con base en indicadores de m³/m² de generación de escombros de construcción y remodelaciones que en la Región Metropolitana se generan 8.790 toneladas/día de escombros, cifra que es cuatro veces la generación de los demás tipos de residuos, con lo cual se ilustra la magnitud del problema. [74].

En el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, para el año 2006, se habían censado 11 escombreras con legalización, las cuales se distribuyen en los diferentes municipios del Valle de la siguiente manera: una en el Municipio de Caldas, tres en La Estrella, dos en Medellín, cuatro en Bello y una en Copacabana. Los demás municipios no cuentan con escombreras autorizadas, según cifras presentadas en el PGIRS para el año de estudio [74]. Sin embargo, se observa la presencia de escombreras sin autorización que prestan sus servicios en la región, razón por la cual la estimación y manejo adecuado de los residuos provenientes de la construcción no puede realizarse con total control, además la vigilancia en la creación y crecimiento de las escombreras ilegales es casi nula.

La cifra de generación de residuos de demolición y construcciones presentada en el PGIRS se halló con base en indicadores de kg/m² de construcción nueva, remodelaciones y obras públicas. Conforme con estas hipótesis, se calcula una generación de 8.790 ton/día en el 2005 por lo que la proyección del plan estima que para el año 2.020 la cifra será cercana a las 11.786 ton/día [74]. En la Tabla 7, se presentan las cifras calculadas y proyectadas en el PGIRS para este tipo de residuos.

La Tabla 7 nos presenta la escala del problema que se genera con residuos como los escombros, especialmente en una región en vía de desarrollo. Por estas cifras se observa la necesidad de plantear alternativas e innovar para buscar soluciones al problema de manera que se pueda mitigar su impacto de la manera más eficiente.

Por lo anterior, muchos investigadores y grupos participes de la industria de la construcción han planteado una posible alternativa, como lo es la inclusión de los escombros como componente alternativo en el concreto, con el fin de reducir la escala del problema ambiental y de esta manera encontrar opciones técnica y económicamente viables para el sector que afecten de manera positiva la sostenibilidad ambiental.

Cuando se exponen importantes ventajas de la reutilización y el reciclaje de escombros para fabricar nuevos concretos, es incuestionable que el beneficio ambiental para los ecosistemas urbanos es evidente y cuantificable. Basta con mencionar que si se reciclara cuando menos el 40 % de los escombros producidos en Medellín diariamente, se estaría hablando de unas 4000 toneladas que no llegarían a puntos negros ni a rellenos sanitarios y que además no se estarían extrayendo de las laderas altamente afectadas del Valle de Aburrá. Pero, de acuerdo a las dinámicas de una sociedad en la cual hasta ahora el factor económico predomina por encima del factor ambiental, se hace necesaria la comprobación científica acerca del desempeño de un material que utilizará escombros como agregados.

Tabla 7. Residuos de construcción y demolición 2005–2020. PGIRS, 2006.

Mes Diciembre	ton/día	ton/mes
2005	8790,82	263724,60
2006	8991,70	269751,00
2007	9192,41	275772,30
2008	9392,96	281788,80
2009	9593,33	287799,90
2010	9793,54	293806,20
2011	9993,58	299807,40
2012	10193,45	305803,50
2013	10393,15	311794,50
2014	10592,68	317780,40
2015	10792,05	323761,50
2016	10991,26	329737,80
2017	11190,29	335708,70
2018	11389,16	341674,80
2019	11587,86	347635,80
2020	11786,40	353592,00

7. IMPLEMENTACIÓN

Para la implementación de alternativas en cualquier industria, especialmente en la industria de la construcción, se hace necesario considerar los diversos aspectos que rodean el tema particular al cual se plantea la alternativa, argumentado que tipo de solución se presenta, la pertinencia de la misma y las ventajas que se obtendrían al implementar un recurso alternativo.

La implementación de alternativas en el sector de la construcción es una tarea ardua, que requiere de liderazgo, visión y exclusión de paradigmas en una industria conservadora. Por tal razón, se observa que una de las características que normalmente se aluden como representativas del sector de la construcción, es el considerable atraso que presenta, respecto de otras industrias productivas, en aspectos como la investigación, el desarrollo y la innovación (*I+D+i*) [75].

Para formular, presentar y posteriormente desarrollar proyectos enfocados al desarrollo social y ambientalmente sostenible de este tipo, es fundamental plantear un modelo asociativo que haga converger los intereses de tres actores: sector público, sector privado y universidades.

Una de las falencias notorias, en la región al igual que en la industria, es la escasa visión a mediano y largo plazo, que trae como consecuencia el fracaso de los intentos por desarrollar iniciativas ambientalmente sostenibles y con gran componente social. También es un obstáculo la predisposición a concentrar el análisis costo-beneficio en los costos directos, sin concebir efectos colaterales positivos.

Por consiguiente, se hace imperioso asumir una actitud proactiva y de mayor iniciativa por parte del sector, como componente fundamental para abordar la *I+D+i*. Con el fin de tener éxito en la misión de adoptar otra disposición y ser propositivos en la industria, es eminente acoger algunas estrategias primordiales [76], como lo son:

- Desarrollo de metodologías para el ahorro y reciclado de materiales de construcción, re-uso y sustitución por materiales renovables, contemplando como elemento fundamental la sostenibilidad ambiental.
- Estudio del impacto ambiental y económico que genera el uso de materiales no convencionales elaborados a partir de residuos sólidos, en la construcción de vivienda.

- Diseño y desarrollo de sistemas constructivos ágiles, económicos y ambientalmente sostenibles, a partir de la producción de elementos elaborados con residuos sólidos.
- Promoción y adopción de normativas en materia de *I+D+i* con el fin estimular el desarrollo de componentes alternativos para la construcción.
- Estudio de la sostenibilidad de la construcción en función de la sustitución real de materiales y productos convencionales.

Las barreras en regulación para la investigación y generación de alternativas en el sector de la construcción se podría afirmar que son prácticamente nulas, puesto que los diferentes códigos y normas de la materia permiten la implementación de diversas iniciativas siempre y cuando estén fundamentadas. Por tal motivo, la posibilidad de generación e implementación de inventivas está abierta para los visionarios y emprendedores.

La implementación de componentes alternativos en el concreto es considerada uno de los métodos más eficientes para el manejo y disposición de grandes cantidades de subproductos [76], ya que los volúmenes de concreto que se presentan en la construcción son muy altos, lo que demanda un alto consumo de materia prima.

Como factor primordial, es necesario realizar consideraciones económicas para la implementación de los subproductos industriales en la construcción, en aspectos básicos como la logística y los acuerdos de precio según el mercado de los materiales, haciendo un paralelo con los beneficios en materia de sostenibilidad ambiental y responsabilidad social, con el fin de llegar a un punto de equilibrio que permite que las barreras para la creación en el sector se rompan.

A continuación se presentan los factores que rodean la implementación de componentes alternativos en la industria de la construcción. En este sentido se plantean unos casos ejemplares que pueden ser útiles para entender la magnitud de la solución y las ventajas que trae consigo la innovación en la tecnología del concreto y el desarrollo sostenible.

7.1 CENIZAS VOLANTES

La reutilización de subproductos se ve afectada por el desconocimiento de las ventajas en diversos los aspectos que trae consigo la utilización de cenizas volantes, debido en gran parte al temor que genera la denominación de residuo o desperdicio que se ha dado al subproducto. Una calificación basada en la falta de conocimiento, y que ha cambiado en el

pensamiento de los emprendedores y visionarios, a medida que han presentado alternativas para el material.

Una de las tareas principales es buscar el manejo adecuado de residuos, explorando alternativas para hacer a un lado la necesidad de disponer en rellenos los diferentes subproductos industriales, razón por la cual la producción de cenizas volantes es considerada un pasivo ambiental de los generadores de energía a través carbón.

El conocimiento de las necesidades del mercado y la relación inmediata entre el investigador y el desarrollo de productos es de suma importancia para la creación de nuevos campos para el reciclaje de las cenizas volantes.

La posibilidad de procesar las cenizas volantes para convertirlas en productos de interés para mercados específicos es una situación que se está convirtiendo en algo ineludible. Este aprovechamiento no solo representa una oportunidad única comercial, sino una necesidad dado el impacto ambiental que se deriva del almacenamiento indiscriminado de estos residuos.

El provecho en la utilización de las cenizas volantes en el concreto está directamente relacionado con el comportamiento de los materiales locales para cada proyecto, en aspectos como la disponibilidad, el precio y la calidad. La disponibilidad de cenizas cambia de un lugar a otro, al igual que el restante de los materiales convencionales necesarios para el concreto, lo que justifica la variabilidad en la proposición y generación de alternativas con el fin de desarrollar un concreto que cumpla con las necesidades del proyecto [77].

En E.E.U.U anualmente se emplean cerca de 6 millones de toneladas de cenizas volantes en la fabricación de cemento y concreto. Las propiedades del concreto con la inclusión de cenizas volantes han reducido los costos totales de construcción y han aportado mejor comportamiento en las propiedades del concreto [78].

A partir de las investigaciones que se han realizado en diferentes institutos y universidades se han establecido unos márgenes de acción para la implementación de cenizas volantes en el concreto. Los autores plantean a partir de sus hallazgos que el rango apropiado para la sustitución de cemento por cenizas volantes varía entre el 5 y el 65%, como consecuencia de la alta reactividad del subproducto. A pesar de esto, en los países donde se presenta mayor desarrollo en ciencia y tecnología como E.E.U.U y Unión Europea, solamente se

llega a realizar una sustitución típica de 30%, y más bajo aún en Colombia donde simplemente se trabaja para algunos casos con una sustitución del 10% [79].

El impulso hacia la implementación de las cenizas volantes en las obras civiles colombianas se presentó aproximadamente hace 15 años. Para entonces el material no tenía costo alguno, inclusive los industriales que poseían el subproducto pagaban para que otros se hicieran cargo de las cenizas volantes, razón por la cual su uso era mucho más conveniente en la construcción. En la actualidad el material ha adquirido un mayor valor, como resultado del incremento de la demanda, pues la divulgación de las investigaciones y los resultados obtenidos en otros países han hecho que se genere un mayor interés por el uso del material en diferentes aplicaciones, no sólo en la industria de la construcción. Asimismo, determinados por la demanda, se han registrado contratos de suministro, convirtiendo la reutilización de las cenizas en un nuevo negocio asociado a la industria de la construcción [79].

Un proceso ejemplar se está presentando en E.E.U.U, donde se están presentando discusiones para considerar la ceniza volante como un residuo peligroso, no por su composición química y los efectos de la misma, sino para que su disposición tenga vigilancia federal en cabeza de la *Environmental Protection Agency (EPA)*. Éste caso demuestra la importancia de la voluntad política para la implementación de alternativas [79].

Otros casos ejemplares sobre lo que se puede llegar a hacer con la implementación de cenizas volantes son:

Bloques de concreto ligero con cenizas volantes [80].

Los bloques livianos de concreto, se presentan como sustitutos viables para los ladrillos y bloques de concreto convencional en la construcción, con una densidad que varía entre 800 kg/m³ y 1800 kg/m³. Los componentes generales de esta tecnología basada en agentes espumantes son el cemento, las cenizas volantes (en una 3^a a 4^a parte del total de los componentes), arena, agua y espuma (generada a partir de agentes espumantes biodegradables). Éste tipo de concreto liviano, inclusive puede ser producido en paneles para losas y muros.

Muchos estudios se han realizado sobre los aspectos durabilidad de bloques de concreto ligero con inclusión de cenizas volantes en diferentes laboratorios e institutos de la India, para lo cual se ha concluido que éste nuevo tipo de bloques son tan durables como ladrillos

de arcilla y de hecho en ciertos ambientes agresivos se desempeñan mejor que los ladrillos de arcilla.

El bloque ligero ofrece unas ventajas sobresalientes con relación a otro tipo de bloque. Éste presenta una mayor resistencia con relación a su peso, que trae como consecuencia una reducción considerable de la carga muerta de la edificación que implica beneficios adicionales para el proyecto, adicionalmente brinda una mejor acústica y aislamiento térmico.

Instituto Peter Kiewit de la Universidad de Nebraska [81].

En una investigación realizada en la Universidad de Nebraska en 1992, las cenizas volantes se utilizaron con éxito en la producción de bloques ligeros de concreto para mampostería de alto rendimiento. Como resultado, el peso de un bloque de mampostería se redujo de 38 libras a 18 libras, alcanzando una resistencia hasta 6.000 psi. La investigación ha sido un gran éxito. El bloque ligero está siendo producido por una compañía local en Omaha, Nebraska, y recientemente ha sido ampliamente utilizado en el Oeste de E.E.U.U. Asimismo, fue utilizado en la construcción del nuevo *Instituto Peter Kiewit* de la Universidad de Nebraska en el campus de Omaha que tuvo un costo de 70 millones de dólares.

Otras iniciativas [82].

El Ministerio de Medio Ambiente y Bosques del Gobierno de la India (Este Ministerio es el principal responsable de preservar el medio ambiente y los bosques en el país) en septiembre de 1999 envió unas notificaciones que contenían la directiva de propiciar una mayor aplicación de las cenizas volantes en la industria de la construcción, algunas de las cuales son:

- En un radio de 100 km a partir de las centrales térmicas que utilicen carbón, los fabricantes de ladrillos, bloques o tejas deben utilizar al menos un 25% de cenizas volantes en sus productos.
- Todas las compañías dedicadas a la construcción de edificios o viviendas, en un radio de 50 a 100 km de las centrales térmicas que utilicen carbón, deben utilizar ladrillos o bloques basados 100% en cenizas volantes, esto para finales de agosto del 2007. En tanto que las compañías que se encuentren dentro de 50 km de radio de la central, la fecha límite para el uso de los ladrillos o bloques fabricados 100% con cenizas volantes

es agosto de 2005. Cabe mencionar que cualquier ladrillo o bloque que contenga más de 25% de cenizas volantes se diseña como elemento netamente de cenizas volantes.

7.2 ESCORIA DE ALTO HORNO

Los cementantes basados en la activación alcalina de escoria siderúrgica de alto horno fueron desarrollados en 1957 en la antigua USSR y hasta la fecha se han publicado diversas investigaciones donde resaltan el desempeño mecánico y de durabilidad de estos materiales frente a los producidos con cemento Portland. Los requerimientos actuales tanto ambientales como técnicos han promovido que la comunidad científica a escala mundial se vincule en esta línea de estudio, a tal punto que se ha llegado a mencionar que sean los materiales cementantes del tercer milenio [83].

Como se mencionó anteriormente, la escoria tiene origen en la industria siderúrgica, principalmente en la fabricación del acero. Anteriormente era considerado un subproducto inservible o desperdicio, sin embargo, en la actualidad es muy aceptada su inclusión en el concreto y, a menudo, es preferido por los diseñadores, hasta el punto de especificarse para diferentes tipos de proyectos por la multiplicidad de usos y ventajas que presenta. Además, su composición puede depender del tipo de metal que se esté fabricando. Aunque la industria del acero probablemente genera la mayor cantidad de escorias, otras escorias siderúrgicas que se producen hoy todavía se están almacenadas en su mayoría, descargadas en vertederos, o reutilizadas en aplicaciones como bases para carreteras. Estos métodos de disposición del material tienen grandes costos ambientales, esencialmente porque estos materiales a menudo contienen metales tóxicos que pueden filtrarse y contaminar las aguas subterráneas [48].

La escoria de alto horno tiene diversas aplicaciones, entre las más comunes se encuentran su implementación como adición al concreto para mampostería, complemento en la fabricación de cemento Pórtland o hasta como estabilizador de suelos [84]. Metha(1983), sugiere que la industria del concreto ofrece condiciones ideales para el uso beneficioso de estas escorias y de las cenizas debido a que los efectos de los metales nocivos pueden ser reducidos e incorporados en la hidratación del cemento [85].

En las aplicaciones en la construcción la escoria es utilizada en la fabricación de concreto, en combinación con cemento Pórtland y otros materiales puzolánicos, para la construcción de estructuras durables, con un porcentaje de sustitución que varía entre el 20 y el 70% en peso de los materiales cementantes [32]; no obstante, la sustitución típica para el concreto es del orden del 50% del peso del material cementante. Ésta escoria está siendo

ampliamente utilizada en Unión Europea, e incrementalmente en E.E.U.U y Asia por su alta durabilidad, extendiendo la vida de las estructuras hasta en un 100% [86].

El costo de la escoria es generalmente del mismo orden que el de cemento Pórtland, principalmente debido a las propiedades beneficiosas que se han descubierto, sobre la misma. Los clientes están dispuestos a pagar tanto por la escoria como el cemento que reemplaza. En el mercado, el precio de la escoria se encuentra condicionado por su nivel de reactividad, por lo que en algunos mercados su precio puede llegar a estar por encima del valor del cemento. Asimismo, por la alta demanda que se presenta por el subproducto, su implementación absorbe altos costos logísticos, pues se pueden presentar pedidos entre continentes [79]. Además, como consecuencia de la configuración original de la escoria, en la que presenta una morfología granulada y de gran dureza, se requiere una molienda con alta demanda de energía, un factor fundamental para considerar la viabilidad en su implementación para determinadas circunstancias.

7.3 MICRO SÍLICE

El humo de sílice es un material extremadamente fino, con partículas que pueden llegar a ser 100 veces más pequeñas que las de cemento. Por su alta finura y reactividad usualmente no requiere procesos adicionales para estar lista para uso, sin embargo se debe manipular y dosificar siguiendo procedimientos especiales [87].

El concreto fabricado en un 100% micro sílice, puede tener de 2 a 3 veces el costo del concreto convencional, como consecuencia del alto valor del micro sílice. Otro factor importante para la inclusión de éste material, es el costo del transporte que también incrementa los costos [87]. Aunque es un material altamente activo, apenas se realiza una sustitución entre 5% y 12% de cemento Pórtland en el concreto, observando una sustitución típica del 10%.

Debido a la alta reactividad de la puzolana en el mercado se genera una alta demanda, que ha llegado al punto de crear industria con el simple propósito de producir este material, es decir, se ha dejado de percibir como subproducto o desecho sino que se ha convertido en un actor importante en la industria de la construcción como material cementante. Es por esto que el precio del material en el mercado está asociado parcialmente a su reactividad y puede llegar a tener un valor 10 veces superior al del cemento Pórtland, adicionalmente, su implementación puede llegar a absorber altos costos logísticos, ya que pueden hacerse pedidos de bajos volúmenes del producto entre continentes [87].

Al igual que los demás subproductos de origen industrial, su reutilización modera su disposición en botaderos, disminuyendo el impacto ambiental al que éste manejo conlleva.

7.4 PUZOLANAS ARTIFICIALES

7.4.1 Ceniza de cascarilla de arroz

La combustión de los residuos agrícolas suprime la materia orgánica y, en la mayoría de los casos, produce una ceniza rica en sílice. Entre los residuos agrícolas abundantes, las cascarillas de arroz producen la ceniza con mayor cantidad de sílice, alrededor del 93% del peso total.

Sin embargo, sólo la sílice amorfa (no cristalina) posee estas propiedades, es por esta razón que la temperatura y duración de la combustión son importantes en la producción de la ceniza de cascarilla de arroz. La sílice amorfa se obtiene calcinando la ceniza a una temperatura menor de 700°C. Una combustión sin control de las cascaras de arroz genera la cristalización de la sílice, que genera una menor reactividad [42]. La forma más viable de mejorar sus propiedades es realizar una quema controlada en incineradores, donde se controle la temperatura y el tiempo de combustión.

Una de las ventajas que se presenta en la implementación de este tipo de cenizas, es que en el país este material es de fácil consecución pues es producido a gran escala en el departamento del Tolima y en los Llanos Orientales. Además, la utilización de la ceniza de cascarilla de arroz favorece el establecimiento de industrias para su obtención.

Experiencia del instituto pakistaní de investigación [41].

Con el fin de buscar facilidades para la implementación de componentes alternativos para el concreto, algunos investigadores han generado diversos desarrollos, como es el caso del incinerador que se muestra en la Figura 11. Éste incinerador, que fue desarrollado primero por el *Pakistan Council of Scientific and Industrial Research* (PCSIR) y mejorado por el *Cement Research Institute* de la India (CRI), es fabricado con ladrillos con muchas aperturas para permitir un buen flujo de aire a la masa de cascarilla de arroz. La superficie interior es cubierta con una malla de alambre fino calibre 16. Las cascarillas son introducidas por la parte superior y la ceniza se retira por la puerta de descarga inferior. Un pirómetro regula la temperatura, que puede ser controlada tapando o abriendo los orificios, manteniendo una temperatura de aproximadamente 650°C entre 2 y 3 horas.

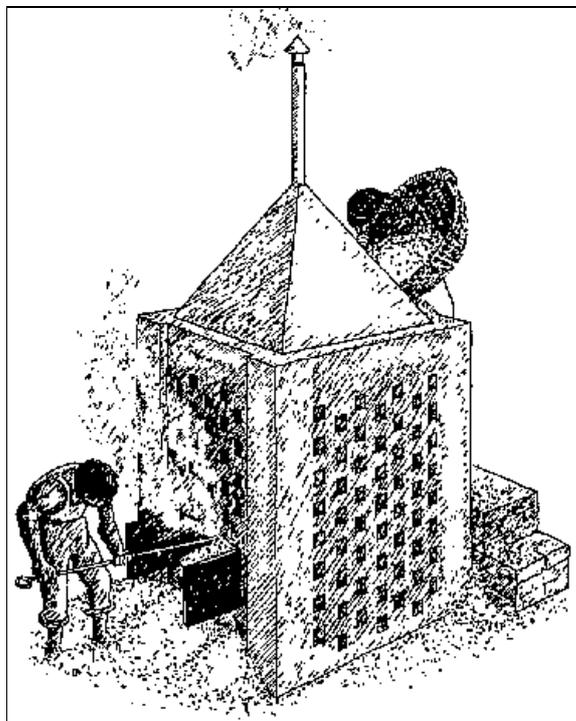


Figura 11. Incinerador de cascarilla de arroz [41].

Adicionalmente, para mejorar la reactividad de la ceniza resultante, ésta es pulverizada en un molino de bolas por aproximadamente una hora, o más si contiene sílice cristalina. La ceniza puede reemplazar hasta 30% del cemento de un mortero o concreto. Alternativamente, puede ser mezclada con 30 a 50% de cal hidratada para ser empleada como cemento en morteros, enlucidos y concreto en masa.

Como producto de éste desarrollo, el *National Building Research Institute* (Karachi), de Pakistán, logró construir la primera vivienda de bajo costo (Figura 12) en la cual se sustituyó totalmente el cemento Pórtland por ceniza de cascarilla de arroz y cal de los bloques de soporte de carga y del mortero. En los dinteles y las vigas del techo, la sustitución del cemento Pórtland fue del 30% por ceniza de cascarilla de arroz.

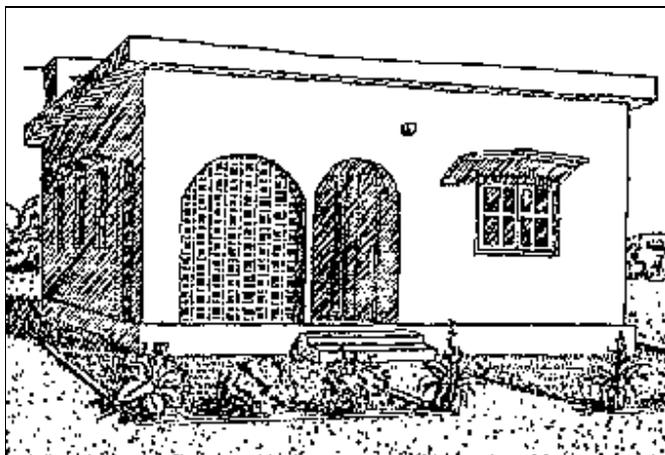


Figura 12. Vivienda a base de cenizas de cascarilla de arroz [41].

7.4.2 Ceniza del bagazo de caña de azúcar

Las cenizas del bagazo de la caña de azúcar se comportan de forma similar a las cenizas volantes, si alcanzan la temperatura de activación y permanece el tiempo de apropiado dentro de la caldera. Así, mezclada con cal, se produce un conglomerante que puede funcionar por sí sólo o al combinarla con alguna cantidad de cemento Pórtland, se pueden ejecutar obras de pequeño nivel. Es fundamental reconocer la mineralogía de la sílice presente en el bagazo antes de quemarlo, para saber si el material es cristalino o amorfo. El primero es el que requiere el proceso de calentamiento apropiado, el segundo está casi listo como material puzolánico y puede separarse directamente de la materia orgánica del bagazo [49].

Ya es conocido que las altas temperaturas de combustión afectan la reactividad de las cenizas usadas como puzolanas. Resulta entonces imprescindible lograr una combustión controlada de los residuos agrícolas, para optimizar la reactividad de las cenizas a producir. Para este fin se hace necesaria la concepción de una instalación para incineración, diseñada para que en ella se puedan ejecutar quemas controladas de los residuos agrícolas [44].

Existen varias referencias sobre construcción y explotación de todo tipo de incineradores para quemar de forma controlada biomasa, con el objetivo de producir cenizas activas. Los incineradores que han tenido mayor éxito son los del tipo Cama Fluidizada (*Fluidized Bed Boiler*) (Figura 13). Los inconvenientes de este tipo de incinerador son sus altos costos de

inversión inicial y de operación y que obliga a procesar grandes cantidades de material para que la inversión sea económicamente viable. Es prácticamente imposible diseñar y construir uno de estos incineradores para talleres de producción discontinua a pequeña escala. Además, se han probado algunos incineradores rústicos, contruidos con materiales simples y de bajo costo, pero su problema radica en la baja productividad que obliga a construir una grupo de varios incineradores que operen simultáneamente, para producir cantidades razonables de cenizas. Esto, a pesar de que ha funcionado a pequeña escala, genera costos de inversión y operación relativamente altos sobre todo comparados con los niveles de productividad del taller. El problema está entonces en diseñar un montaje que permita realizar una combustión controlada, con niveles adecuados de productividad (al menos 25 kg/h), y con bajos costos de inversión y operación [44].



Figura 13. Incinerador de Cama Fluidizada. IndiaMart.

Un ejemplo sobre cómo se redujeron los costos en la construcción de vivienda de interés social en Colombia [88].

La Federación Nacional de Vivienda Popular de Colombia (FENAVIP) y la Corporación CONSTRUIR generaron un proyecto en el cual planteaban la reducción de los costos en la construcción de vivienda de interés social con bloques de concreto, para los cuales se implementaron cenizas producto de la incineración del bagazo de caña. En el proyecto se plantearon desarrollos que buscaban principalmente optimizar el diseño de mezcla para la prefabricación de bloques de concreto, la fabricación de losas y fundaciones en concreto y

la elaboración de morteros de inyección, reduciendo los costos de producción aplicando tecnologías innovadoras.

FENAVIP, fabricó bloques de concreto con un consumo promedio de 2,1 kg de cemento Pórtland (Tipo I) por bloque. Esta cantidad de cemento aseguraba la resistencia de 80 kg/cm² establecida en la NSR-98 para la construcción con bloques estructurales.

La Corporación CONSTRUIR en sus desarrollos logró optimizar las mezclas con una disminución significativa del consumo de cemento por bloque. Se hizo el desarrollo utilizando 0,5 kg de cemento Pórtland (Tipo III) por bloque e incorporando adiciones activas e inertes. Con esta dosificación se cumplió con las especificaciones exigidas por la NSR-98, para construir VIS con muros estructurales en bloques. La cantidad total utilizada de material cementante (cemento más adiciones), fue de 1,2 kg por bloque. Los bloques fabricados con esta metodología alcanzaron la resistencia especificada a 28 días entre los 7 y los 14 días. Además, los bloques se curaron hidrotérmicamente en un invernadero a 50 °C, con una humedad relativa mínima del 85 %.

La cantidad de cemento utilizada por FENAVIP para elaborar concretos de 3.000 psi, era de 7 sacos (350 kg/m³ de concreto). Mientras que la Corporación CONSTRUIR, optimizó el diseño de mezcla con el método de los mínimos espacios vacíos. Así se diseñaron concretos de 3.000 psi con 270 kg de cemento Pórtland tipo III y se incorporaron 70 kg de adición, todo por m³ de concreto. Con esta dosificación se garantizó la resistencia especificada. Para la fabricación de estos elementos se empleó un superplastificante con el cual se controló la relación agua/cemento. La cantidad de aditivo utilizada fue 1,5 % del peso del cemento, equivalente a 4 kg por m³ de concreto.

Para la construcción de la cimentación, conforme las especificaciones de diseño, se requerían concretos de 3.000 psi. Para cumplir con los requerimientos de resistencia, se utilizaron 350 kg de cemento por m³ de concreto. De igual modo, para la construcción de la losa se utilizaron 300 kg de cemento por m³ de concreto. Con esta cantidad de cemento se alcanzaron 2.500 psi de resistencia a compresión. En el desarrollo realizado por CONSTRUIR se diseñaron concretos de 3.000 psi con la utilización de 270 kg de cemento más 70 kg de adición, para un total de 340 kg de material cementante por m³ de concreto. En el caso de los concretos para losas, se emplearon 240 kg de cemento más 80 kg de adición, obteniéndose concretos de 2.500 psi a los 28 días.

La vivienda resultado del desarrollo descrito previamente, se presenta en la Figura 14 que aparece a continuación:

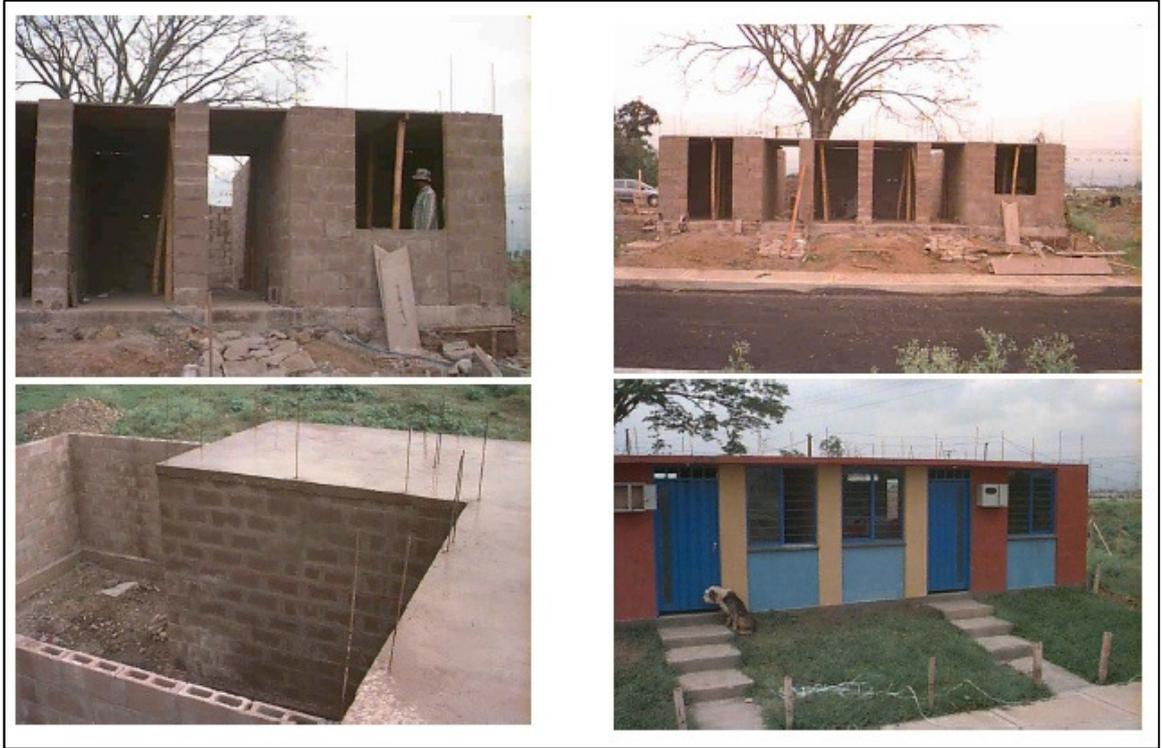


Figura 14. Vivienda típica proyecto FENAVIP-CONSTRUIR. ECOMAT [88].

7.5 AGREGADOS RECICLADOS

En las regulaciones ambientales tradicionales la producción de escombros por lo general era considerado como una emisión, de igual forma se ha despreciado su impacto ambiental. La industria de la construcción, dentro de este marco, cuando diseña o planifica un producto no es consciente de los costos de manejo y de las implicaciones de los residuos del producto.

La utilización de árido reciclado es cada vez más habitual en el campo de la construcción, en ámbitos muy variados como son la construcción de explanaciones (terraplenes y rellenos), bases o sub-bases de carreteras, o en la fabricación de concreto. El destino de estos materiales reciclados depende de la naturaleza o composición mayoritaria de los residuos. Así, mientras que para explanaciones se suelen utilizar materiales provenientes tanto de residuos mixtos, como de asfalto, de concreto o combinaciones de estos, para

otras aplicaciones más restrictivas, como la fabricación de concreto, los materiales reciclados suelen proceder de residuos de concreto o en algunos casos de mezcla de residuos de concreto y cerámicos. Cada una de estas aplicaciones obliga a establecer distintos niveles de exigencias en las propiedades del árido reciclado, siendo las más restrictivas las destinadas para los áridos que a emplear en concreto estructural [89].

En la industria se debe implementar y generalizar el concepto de desconstrucción de un edificio, que no se refiere a su demolición. Al contrario, implica la reutilización de la mayoría de los materiales con los que fue construido, de tal forma que se alcance un alto porcentaje de reciclado para generar la menor cantidad de residuos. Como factor importante se debe plantear desde el diseño la manera como los elementos a construir y sus materiales serán desensamblados o demolidos [89].

Experiencias en España [46].

Aunque a nivel práctico el uso de árido reciclado procedente de concreto para la fabricación de un nuevo concreto es muy reducido en España, existen ya algunos casos en los que se ha utilizado o está previsto utilizar áridos reciclados, los cuales se mencionan a continuación.

El Puente de Marina Seca del Forum (2004) [46].

El Puente de Marina Seca del Forum 2004 de Barcelona es una de las obras emblemáticas del *Forum 2004* de Barcelona, fue construido utilizando concreto reciclado en alguno de sus elementos. Se utilizó un árido reciclado de un único origen (fracción 4/25 mm), con una absorción media de 6,7%, libre de cloruros, y sulfatos. Más del 95% del árido reciclado eran partículas de concreto. La cantidad de finos inferiores a 0,063 mm fue del 1% y el aporte de finos menores de 4 mm fue del 10%, lo que obligó a una ligera corrección en la cantidad de arena.

Se utilizó una sustitución del 20% de árido reciclado previamente presaturado, con un grado de saturación entre el 80% y el 90%. La resistencia obtenida fue de 47,8 MPa, y los resultados de los ensayos de penetración de agua fueron adecuados. La puesta en obra de este concreto tampoco presentó ninguna dificultad.

Puente atirantado sobre el río Turia [46].

La experiencia piloto, que finalizó en el año 2008, planteó la utilización de concreto reciclado en un puente atirantado de concreto armado, situado en Manises (Valencia), propiedad de la Diputación de Valencia.

Este puente se ejecutó como sustitución de una estructura de concreto ya existente. El objetivo del proyecto era reciclar el material de concreto procedente de esta estructura para la fabricación de una fracción del concreto de la nueva estructura, utilizando una sustitución del 20% del árido natural por árido reciclado en el concreto de un tramo de la losa.

Las condiciones de utilización de los áridos reciclados y del concreto fueron las siguientes:

- El árido reciclado en reemplazo de árido natural, se implementaría en un porcentaje no superior al 20%. Asimismo, el árido debía cumplir con las especificaciones que establece la Instrucción de Concreto Estructural (EHE) para los áridos naturales.
- El concreto de origen para el reciclaje debía presentar una resistencia superior a 25 N/mm² y menor de 50 N/mm².

Normativa técnica España [46].

En Noviembre de 2002 se constituyó el Grupo de Trabajo “Concreto Reciclado” a instancias de la Comisión Permanente del Concreto y de ACHE para elaborar un documento que complementara a la reglamentación actual de concreto estructural (EHE). La nueva EHE incluye un anexo (Anexo 15), que recoge las recomendaciones específicas sobre la utilización del árido reciclado proveniente de concreto, para aplicación en concreto estructural. Además, la utilización de árido reciclado procedente de concreto para concreto no estructural está incluida en el Anexo 18 de la EHE.

Experiencia en Colombia. Edificio de laboratorios Universidad Nacional, sede Medellín [90].

El edificio de laboratorios construido en la sede de Medellín de la Universidad Nacional de Colombia (2001), aunque su fachada no reviste sorpresa alguna, está constituida por bloques de concreto pegados entre sí por una capa de mortero de cemento Pórtland; bloques que tienen como materia prima agregados reciclados de material cerámico descartado por las industrias productoras de la ciudad de Medellín. La firma INDURAL

S.A, una de las más antiguas empresas de prefabricados en Colombia, ubicada en la ciudad de Medellín, ha venido implementando la práctica de utilizar escombros seleccionados en la producción de sus prefabricados, tales como bloques y adoquines, entre otros.



Figura 15. Edificio de laboratorios Universidad Nacional, sede Medellín [90].