

# 1. INTRODUCCIÓN

---

## 1.1. ASPECTOS GENERALES

Con el auge en el crecimiento demográfico e industrial en la India, la necesidad de la energía ha aumentado. Casi el 73% de la capacidad total de generación de energía es energía térmica, el 90% de la cual se genera a base de carbón. La generación de energía térmica mediante la combustión de carbón produce partículas de ceniza que causan serios problemas ambientales.

Conocido comúnmente como cenizas volantes, las cenizas están compuestas de silicio, aluminio, óxido de hierro, de calcio y de magnesio y metales tóxicos como arsénico, cobalto y cobre.

El Banco Mundial ha advertido que hacia el 2015, en la India se necesitarán 1000 kilómetros cuadrados o un metro cuadrado por persona para almacenar todas las cenizas volantes que se habrán producido. También ha destacado la necesidad de métodos nuevos e innovadores para reducir el impacto ambiental que esto produce. En el informe *Environmental issues in the power sector*, el Banco Mundial usa un instrumento de toma de decisiones para evaluar estrategias para reducir al mínimo los impactos ambientales producidos.

Más de 100 millones de toneladas de cenizas volantes son generadas cada año en India, con 26.300 hectáreas de tierra ocupadas por charcas de cenizas. Una tan enorme cantidad realmente plantea problemas, peligros para la salud y peligros ambientales. Se tiene que considerar medidas para la disposición y uso de este residuo con el objetivo de salvaguardar el interés de la vida humana, la vida salvaje, y otras consideraciones.

El uso de las cenizas en el hormigón tiene las siguientes ventajas:

- Reducción del contenido de cemento para reducir el coste

- Reducción del calor de hidratación.
- Mejorar la trabajabilidad
- Conseguir resistencia elevadas a largo plazo
- Reducción de la permeabilidad

Las cenizas volantes, como cualquier otro producto que sea utilizado a escala industrial, deben ser debidamente caracterizadas en su conjunto, por lo tanto, su utilización dependerá de la variabilidad de las diferentes partículas.

Uno de los aspectos más importantes para estudiar este producto son las características químicas, mineralógicas, morfológicas y físicas. Para el aprovechamiento de las mismas en ingeniería civil es imprescindible el conocimiento de su reactividad e hidratación.

Las características químicas de las cenizas volantes están ligadas al tipo de carbón que las originan, así como también a las transformaciones que se ocasionan mediante la combustión de los mismos a diversas temperaturas a que se les someten, por lo tanto se trata de un producto de gran heterogeneidad cuya matriz de composición está formada básicamente por varios componentes, algunos de los cuales se presentan en una mayor abundancia y que se definen como componentes mayoritarios de las cenizas volantes, estos son: sílice ( $\text{SiO}_2$ ), alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) y carbón (C). En una proporción más reducida (aproximadamente entre el 0.1% y el 5.0% en peso) se presentan los componentes minoritarios como la magnesia ( $\text{MgO}$ ), óxidos de azufre ( $\text{SO}_x$ ) y álcalis en forma oxidada ( $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$ ).

Entre las propiedades requeridas para el uso de las cenizas volantes en el mundo de la construcción debemos considerar la composición química, utilizada como método para diferenciar las cenizas volantes. Es conveniente recordar que no es la variable más importante que influye en el comportamiento de las cenizas volantes. En los apartados posteriores de este capítulo describiremos otras variables como las características físicas, las mineralógicas y las morfológicas. No obstante, las normativas de varios países exigen requerimientos en cuanto a las cantidades de silicatos, óxidos y sulfatos, en particular la suma de sílice [ $\text{SiO}_2$ ] + alúmina [ $\text{Al}_2\text{O}_3$ ] + óxido de hierro [ $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ], así como de cal total y libre [ $\text{CaO}$ ], el contenido de sulfatos expresados en [ $\text{SO}_3$ ], los álcalis solubles [ $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$ ] y la pérdida por calcinación.

La suma de la sílice, alúmina y óxidos debe superar un cierto valor tal y como se especifica en las normativas americanas y españolas acerca de las cenizas volantes que son utilizables en hormigones y cementos. Esto se debe principalmente a su reactividad, consecuentemente lo más importante es identificar en qué estado se encuentra el óxido, si bien como material es cristalino, y por lo tanto no reactivo o si bien como vidrio, que reacciona con la portlandita [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ].

Existen dos clases de cenizas volantes, una definida por la clase F y la otra por clase C. Se diferencian en la composición del material. Las cenizas volantes de clase F que son las más abundantes, tienen menos de un 15% de cal y

contienen un porcentaje alto de la combinación de sílice, alúmina y óxido de hierro (superior al 70%)

La ceniza volante clase C tiene un porcentaje alto de cal, muchas veces superior al 30%.

El tipo de ceniza volante que encontramos en la planta térmica de Mudunuru, a 120 km de la Fundación Vicente Ferrer, es una ceniza volante de clase F.

Propiedades cenizas volantes clase F:

- Menor calor de hidratación, por ello la ceniza volante clase F es recomendable en aquellos sitios donde pueden tener temperaturas calurosas, como es el caso de la zona de estudio en la India.
- Alta resistencia a sulfatos, igual o mayor a un cemento tipo V.

Es necesario determinar adecuadamente la composición, en principio ya que sabemos que la ceniza volante tendrá una muy baja cantidad de cal, siendo ésta la gran diferencia respecto a un cemento.

La ganancia de la resistencia a compresión de las mezclas con cenizas volantes es más lenta que las que no tienen. Con el tiempo, la resistencia a compresión con CV será, en principio, superior al convencional. De acuerdo con algunos ensayos realizados, se dice que la desviación estándar de la resistencia a compresión de las mezclas con CV es inferior a una convencional.

Para que la resistencia a largo tiempo sea más alta, las cenizas volantes reaccionan con la portlandita del cemento y por lo tanto para que se produzca la reacción de las CV con la portlandita el curado de los hormigones con CV ha de ser más largo que en un hormigón convencional.

La planta térmica de Mudunuru genera 2.000 T de CV al día, lo que supone 730.000 T al año de residuos, que equivale a un volumen de aproximadamente 360.000 m<sup>3</sup>. Tal cantidad de residuos necesita una buena gestión para evitar problemas. Una buena solución para ello sería hallar una aplicación de esas cenizas para reducir ese volumen de residuos tan grande.

## 1.2. METODOLOGÍA Y MATERIALES UTILIZADOS EN LA ZONA DE ESTUDIO

Tanto el mortero de cemento como el hormigón son materiales que se utilizan en múltiples ámbitos de la construcción en la India. Lo que diferencia sus propiedades es, por un lado la dosificación con la que se mezclen sus componentes, así como también las propiedades de cada uno de ellos.

A continuación se muestran algunas de las dosificaciones más comúnmente utilizadas en la India que servirán de partida para la realización del estudio. Es importante destacar que las mezclas fabricadas en la zona de estudio se realizan en volumen y no en peso como se hace aquí, por lo tanto deberemos realizar las correspondientes correcciones para la correcta fabricación de las mezclas. Así pues, las siguientes dosificaciones están expresadas en volumen, tal y como se nos han facilitado:

*Petos perimetrales para la futura excavación:* la dosificación del mortero de unión no supera los 1:10 (una parte de cemento por diez de arena), ya que es un elemento que se derruirá posteriormente.

*Muretes y viga riostra:* mortero de agarre de dosificación de 1:6

*Cerramientos y albañilería:* mortero de dosificación 1:6

*Solados y alicatados:* el espesor de ambas piezas alcanza los 3-4cm y son recibidas con una cama de mortero de dosificación 1:8 de unos 6 cm.

*Muretes de obra:* de 2m de altura y 50cm de ancho en los que se apoyan las láminas de hormigón armado de dosificación 1:1.5:3 (una parte de cemento por 1.5 de arena y 3 de gravas) y acero de Ø6mm.

*Hormigón:* la dosificación habitual del hormigón convencional es de 1:2:4 (cemento:arena:grava).

En la figura 1 se pueden ver diversas imágenes del uso de mortero y hormigón en la zona de estudio:



Figura 1. Mortero y hormigón en la zona de estudio

### 1.3. OBJETIVOS

Tal y como indica el título del documento, el objetivo general de este estudio es analizar la aplicabilidad de las cenizas volantes procedentes de la planta térmica de Mudunuru, en la India, en morteros y hormigones.

El estudio de las cenizas volantes como adición para la fabricación de morteros y hormigón ha sido ampliamente probado y se ha comprobado numerosas veces los beneficios que puede aportar a estas mezclas con cemento. El uso de las cenizas volantes como adición no es ni mucho menos novedoso puesto que los romanos fueron los precursores utilizando las cenizas del volcán Vesubio para su uso en la construcción. Concretamente, el nombre puzolana proviene de la ciudad italiana Pozzuoli de donde sacaron gran cantidad de las cenizas que utilizaron. Uno de los ejemplos más representativos del uso de las cenizas fue para la construcción del Coliseo en el año 100 d.C. Este ejemplo demuestra que este uso produce un material que permanece en el tiempo con buenos resultados.

La importancia de nuestro estudio radica en el hecho que las cenizas volantes pueden ser muy diferentes en función de la planta térmica y de los procesos de filtrado y por ello se debe estudiar cuidadosamente su reactividad para poder utilizarlas como adición en las mezclas cementicias.

El primer paso consistirá en la búsqueda de información de todos aquellos estudios relacionados con el tema. Para ello se utilizarán las bases de datos de revistas científicas relacionadas con este ámbito. Además también se buscarán todas las normas que se necesitarán más adelante para la realización de los ensayos.

Se empezará con la determinación del porcentaje de cenizas que producen un mejor comportamiento en los morteros. Para ello se prepararán mezclas con diferentes porcentajes de cemento y cenizas para ensayarlas a 7, 28, 56 y 90 días y poder determinar así la curva de desarrollo de las resistencias tanto a flexotracción como a compresión. Comparando estas curvas con una mezcla de mortero de control (fabricado sin la adición de cenizas volantes) se podrán determinar aquellas mezclas que proporcionen mejores resultados.

A partir de estos resultados, se planificará una segunda campaña experimental de fabricación de morteros en la cual se intentará optimizar la resistencia manteniendo la trabajabilidad. Se estudiará la relación entre la consistencia y la resistencia así como también se intentará hallar alguna relación con las cantidades de agua, cemento y cenizas.

Partiendo del análisis realizado hasta ese momento, se fabricarán morteros de albañilería de dosificaciones similares a las que ya se utilizan en la zona de estudio en la actualidad, pero incorporando las cenizas volantes como adición.

La última parte de la fase experimental consistirá en la fabricación de hormigones siguiendo las dosificaciones propias de la zona de estudio,

partiendo de los resultados obtenidos en los morteros. Se trata de optimizar las propiedades de la mezcla tanto en estado fresco como endurecido.

Las conclusiones del estudio se presentarán a modo de guía de referencia para su uso directo en la zona de estudio indicando las dosificaciones que obtienen mejores resultados, así como las propiedades que cabe esperar y sus posibles usos.

Este estudio forma parte de un proyecto de cooperación con la Fundación Vicente Ferrer y como tal los objetivos van mucho más allá que los meramente experimentales. Tiene un alto componente social de modo que las conclusiones obtenidas se deben poder ejecutar de manera simple sin necesitar una tecnología más compleja de la que se pueda disponer en esa zona.

## 1.4. ESTRUCTURA DE LA TESINA

En la presente tesina se ha pretendido realizar una aproximación a la aplicabilidad de las cenizas volantes en morteros y hormigones.

En este primer capítulo se introduce el estudio con los aspectos más generales del documento.

En el capítulo 2 se encuentra toda la información hallada referente a las cenizas volantes encontrada en las principales revistas científicas. Así se puede conocer el estado en el que se encuentra el estudio de las cenizas volantes en nuestro ámbito.

En el capítulo 3 se analiza el comportamiento de las cenizas en el mortero de cemento. Para ello se fabricaron morteros con dosificaciones estándar analizando diferentes porcentajes de reducción de cemento y de adición de cenizas. Se trataba de una primera aproximación donde se pudieron observar las principales propiedades que proporcionan las cenizas en las mezclas cementicias. A continuación se quisieron optimizar los resultados obtenidos relacionados con las resistencias en esa primera fase reduciendo la relación agua/cemento pero manteniendo la trabajabilidad del mortero de control, puesto que se trata de una de las propiedades más importantes del mortero fresco, sobre todo para morteros de albañilería. De este modo se consiguieron morteros con resistencias adecuadas en mezclas con menos cemento y la cantidad apropiada de cenizas. Finalmente, a partir de las dosificaciones que habían presentado mejores resultados se pasó a la fabricación de morteros de albañilería. Se trata de la aplicación más directa de los resultados puesto que es uno de los compuestos más utilizados en el mundo de la construcción, junto con el hormigón. En este bloque se estudiaron las principales propiedades del mortero en estado fresco (básicamente la trabajabilidad) y endurecido (las resistencias a flexotracción y a compresión, así como su evolución en el tiempo). Aprovechando la gran cantidad de datos obtenidos, se realizó un análisis estadístico de diferentes parámetros con el fin de establecer relaciones empíricas que permitan conocer más a fondo el comportamiento de las cenizas volantes en los morteros.

Después, en el capítulo 4 se estudia la aplicabilidad de las cenizas en la fabricación de hormigón partiendo de los resultados obtenidos en la campaña experimental de los morteros. Para ello, se utilizaron las dosificaciones más habituales en la zona de estudio, pero utilizando la relación obtenida en la fabricación de morteros entre el agua, el cemento y las cenizas. Después de un primer intento fallido, se fabricaron 4 dosificaciones diferentes. Tal y como se había hecho en el caso de la fabricación de los morteros, se estudiaron las propiedades del hormigón fresco (medida de la consistencia mediante el cono de Abrams) y del hormigón endurecido (propiedades mecánicas de resistencia a tracción, compresión). En los hormigones también se estudió la permeabilidad, el módulo de elasticidad y la densidad.

A partir de estas campañas experimentales, en el capítulo 5, se presentan unas conclusiones que pretenden servir como referencia en la zona de estudio para

que se puedan fabricar morteros de cemento y hormigones reduciendo la cantidad de cemento a la vez que se incorpore las cenizas como adición de las mezclas cementicias.

El objetivo principal de esta tesina sería obtener unos materiales más económicos así como también más sostenibles colaborando así con el desarrollo de zonas desfavorecidas de la India, concretamente la zona de Anantapur, una de las zonas más pobres de la India.

Para la realización de todos los ensayos y la correcta fabricación de los diferentes materiales se buscaron todas las normas necesarias para la correcta ejecución. Así pues, se detalla toda la información relativa a los ensayos realizados. Cabe destacar que esta tesina tiene un importante carácter experimental que se ha podido realizar en el laboratorio de materiales de construcción de la *Universitat Politècnica de Catalunya* con el apoyo económico del *Centre de Cooperació per al Desenvolupament*.