



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA MAZATLÁN**

INGENIERÍA CIVIL

**PROCESO DE FABRICACIÓN Y COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL  
CEMENTO PORTLAND**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

**CERECER OSUNA JESÚS ABRAHAM**  
**VALDÉS PONCE ELIAS**

DIRECTORES DE TESIS:

**DR. VÍCTOR MANUEL MARTÍNEZ GARCÍA**  
**DRA. ALMA DELIA FIGUEROA SUAREZ**

MAZATLÁN, SINALOA, DICIEMBRE 2022

## RESUMEN:

La presente tesis pertenece a una serie de 14 investigaciones que están realizando un colectivo académico integrado por jóvenes emprendedores preocupados por la sociedad, los aspectos sustentables y constructivos, buscando abordar conocimiento de punta en los temas relacionados con el cemento, concreto, sistemas constructivos y ecotecnias aplicadas a la construcción.

Al hablar de tecnología del concreto, lo primero que hay que preguntarse es cuál va a ser la utilidad del concreto que se desarrolla; para ello se han desarrollado trabajos que establecen diseños y algunos procesos con el fin de ingresar nuevos materiales a los procesos de producción.

De los materiales de mayor consumo en construcción, el concreto es determinante en la ejecución de muchos procesos constructivos. Por ello es importante conocer la variedad de los existentes, saber sobre las características, ventajas y desventajas dependiendo del proyecto para el que se utilizará para tener una correcta utilización, aprovechar la efectividad y rendimiento del cemento a utilizar.

## AGRADECIMIENTOS

*La presente investigación se logró gracias a esfuerzos y motivaciones personales, y al apoyo de las personas que estuvieron incondicionalmente cuando las necesitamos, es por eso que por este medio queremos agradecer de forma sincera a todos ellos. En primer lugar, agradecemos a nuestros padres, por haber estado con nosotros en todo momento, por haber confiado siempre ciegamente en nosotros, por los valores inculcados y por todo el apoyo que nos han brindado a lo largo de nuestra vida. Agradecemos todo el apoyo de nuestros directores de tesis por habernos brindado su tiempo, su ayuda y sus conocimientos, gracias al esfuerzo implementado para que se tuviera una investigación de calidad y por su disponibilidad. Agradecemos también a nuestros compañeros y amigos que nos brindaron su apoyo y su tiempo en nuestra investigación. A todos nuestros familiares que confiaron en nosotros. Por último y no menos importante agradecemos a la **Escuela de Ingeniería Mazatlán** y nuestro director el **M.I Edgar Omar Burgueño Sánchez**, por permitirnos ser parte de sus alumnos y gracias al facilitarnos las instalaciones y llevar a cabo este proyecto.*

## ÍNDICE

Portada .....	1
RESUMEN:.....	2
AGRADECIMIENTOS .....	3
<b>CAPÍTULO I.-CONSTRUCCIÓN DEL OBJETO DE ESTUDIO .....</b>	<b>6</b>
<b>1.1.- Introducción. ....</b>	<b>6</b>
<b>1.2. Antecedentes .....</b>	<b>7</b>
<b>1.3. Planteamiento Del Problema.....</b>	<b>18</b>
<b>1.4. Justificación .....</b>	<b>20</b>
<b>1.5. Objetivo General .....</b>	<b>21</b>
<i>1.5.1.- Objetivos Específicos.....</i>	<i>21</i>
<b>CAPÍTULO II.-MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>22</b>
<b>2.1.-Proceso De Fabricación Y Composición Química Del Cemento Portland. ....</b>	<b>22</b>
<i>2.1.1. El cemento Portland .....</i>	<i>22</i>
<i>2.1.2. Qué Se Conoce Como Cemento Portland En La Actualidad.....</i>	<i>23</i>
<b>2.1.3. Canales de distribución.....</b>	<b>29</b>
<b>2.1.4. Proceso de fabricación del cemento .....</b>	<b>33</b>
<i>2.1.5. Componentes Del Cemento Portland.....</i>	<i>37</i>
<b>2.1.6. Obtención Y Preparación De Materias Primas. ....</b>	<b>39</b>
<i>2.1.7. Los Conglomerantes Y El Cemento. ....</i>	<i>43</i>
<i>2.1.8. Molienda Y Cocción De Materias Primas. ....</i>	<i>45</i>
<i>2.1.9. Procesos De Fabricación Del Clinker. ....</i>	<i>49</i>
<i>2.1.10. Molienda De Cemento. ....</i>	<i>55</i>
<b>2.2. Propiedades Químicas.....</b>	<b>59</b>
<i>2.2.1. Composición Química Del Cemento Portland. ....</i>	<i>59</i>
<i>2.2.2. Hidratación Del Cemento. ....</i>	<i>63</i>
<i>2.2.3. Formación De La Pasta De Cemento. ....</i>	<i>63</i>
<i>2.2.4. Las Reacciones De Hidratación.....</i>	<i>65</i>
<i>2.2.5. Calor De Hidratación. ....</i>	<i>68</i>
<i>2.2.6. Resistencia A Los Sulfatos. ....</i>	<i>70</i>
<i>2.2.7. Propiedades Físicas Y Mecánicas Del Cemento. ....</i>	<i>70</i>

<b>2.3. Influencia De Sus Principales Compuestos De Cemento.</b> .....	78
<b>2.3.1. Cementos Mezclas: Influencia Del Tamaño De Las Partículas De Escoria.</b> .....	78
<b>2.3.2. Presentación De Los Resultados.</b> .....	88
<b>CAPÍTULO III.- METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN</b> .....	100
<b>3.1.-Introducción.</b> .....	100
<b>3.2 ANÁLISIS DE DATOS</b> .....	100
<b>3.3 DELIMITACIÓN DE LA MUESTRA DE ESTUDIO</b> .....	100
<b>3.4 RECOLECCIÓN DE DATOS</b> .....	100
<b>3.5 LUGAR DE INVESTIGACIÓN</b> .....	101
<b>3.6 PLANTEAMIENTO DE HIPÓTESIS</b> .....	101
<b>3.7 INTRODUCCIÓN</b> .....	101
<b>3.8 Técnicas De Investigación</b> .....	104
<b>3.10 La Entrevista, Observación, Dispositivos Digitales.</b> .....	113
<b>CAPÍTULO IV.-RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.</b> .....	116
<b>4.1 Conclusiones.</b> .....	116
<b>4.1.1 Sostenibilidad de la fabricación del cemento.</b> .....	116
<b>4.1.2. El concreto como material sostenible.</b> .....	116
<b>4.1.3. Concreto permeable.</b> .....	117
<b>4.1.4. La fabricación del cemento y el medio ambiente.</b> .....	121
<b>Bibliografía.</b> .....	124

## **CAPÍTULO I.-CONSTRUCCIÓN DEL OBJETO DE ESTUDIO**

### **1.1.- Introducción.**

El cemento Portland es el tipo de cemento más utilizado como aglomerante para la preparación del hormigón o concreto. Este material que funciona como un conglomerante o cemento hidráulico cuando se mezcla con áridos, agua y fibras de acero discontinuas y discretas tiene la propiedad de conformar una masa pétreo resistente y duradera denominada hormigón.

Es el más usual en la construcción y es utilizado como conglomerante para la preparación del hormigón (llamado concreto en varias partes de Hispanoamérica). Como cemento hidráulico tiene la propiedad de fraguar y endurecer en presencia de agua, al reaccionar químicamente con ella para formar un material de buenas propiedades aglutinantes. Este material fue inventado en 1824 en Inglaterra por el constructor Joseph Aspdin. El nombre se debe a la semejanza en aspecto con las rocas que se encuentran en la isla de Pórtland, en el condado de Dorset y suele poseer un color gris pizarra intenso o bien un color marfil pálido (en cuyo caso se hace llamar cemento blanco).

## 1.2. Antecedentes

Hacia el año 30 a. de c. se empezó a utilizar el cemento en la Antigua Roma. La bóveda del Panteón es un ejemplo de la utilización del cemento en la antigua Roma. Hacia el año 30 a. de c. Se empezó a utilizar el cemento en la Antigua Roma. La bóveda del Panteón es un ejemplo de la utilización del cemento en la antigua Roma.

La historia de los conglomerantes y cementos en la construcción se remonta a los tiempos del antiguo Egipto, seguido por griegos y romanos. En general, todos los materiales entonces empleados eran productos naturales que, en algún caso, se sometían a tratamientos térmicos.

La palabra cemento, se aplica a todo tipo de producto o mezcla que presenta propiedades adhesivas y entendemos por conglomerante un compuesto de una o varias sustancias capaces de endurecer al reaccionar con otros productos (agua en el caso de los cementos portland), a corto o largo plazo. El nombre cemento como material de construcción tiene su origen en los romanos, que llamaron opus caementum a una obra de mampostería de piedra y un

conglomerante de cal viva. Más tarde, se nombró como *cementum*, *cimentum*, *caement* y *cement* a los conglomerantes hidráulicos que se obtenían al mezclar adiciones tales como ladrillos cerámicos triturados o toba volcánica con la cal viva. Desde los tiempos de las antiguas Grecia y Roma y hasta mediados del siglo XVIII se empleaba la cal como conglomerante para las construcciones.

Este conglomerante no posee la cualidad de endurecer bajo el agua cuando se hidrata, es decir, no es hidráulico. Los técnicos de aquellas épocas relacionaban la mayor pureza y blancura con los conglomerantes más resistentes. Sin embargo, cuando se les adiciona en determinadas circunstancias materiales de origen volcánico o materiales de alfarería triturados a los morteros obtenidos se obtenía una mejor resistencia química frente al agua natural y de un modo especial frente al agua de mar.

Vitrubio, en su tratado de arquitectura publicado en el siglo I antes de Cristo, da una dosificación de un «cemento romano» que se obtenía mezclando dos partes de puzolana y una parte de cal apagada. Las puzolanas procedían de las cenizas volcánicas (tobas) que se encontraban al pie del Vesubio en



Pozzuoli, de donde proviene el término puzolana. Pozzuoli es una localidad de la provincia de Nápoles (región de Campania, en Italia).

Por otro lado, los griegos habían utilizado las tobas de Santorini. En otros lugares se emplearon adiciones análogas tales como el trass holandés, procedente de Andernach del Rin, etcétera. Con el «cemento romano» se construyeron obras importantes, entre las que destaca el Foro romano y el Panteón de Roma (año 27 antes de Cristo). En aquella época, se utilizaron en la construcción mezclas de cal, agua, piedras, arena y ladrillos; un material similar al hormigón. Estos materiales han sido la base para la construcción en Europa hasta 1756, fecha en la que se descubrió el primer conglomerante hidráulico.

La necesidad de construir en zonas marinas ha creado la inquietud de tratar de buscar conglomerantes capaces de fraguar y endurecer bajo el agua y que, a su vez, resistan la acción agresiva del agua de mar. A mediados del siglo XVIII, el gobierno inglés se preocupó de encargarse de la elección de los mejores conglomerantes disponibles en aquel momento para llevar a cabo la edificación del faro de Eddystone, que debía emplazarse en la costa de Cornwall cerca de

la bahía del puerto de Plymouth, al suroeste de Inglaterra y en una zona rocosa y poco profunda. John Smeaton (1724-1792) llevó a cabo la selección de los materiales del faro de Eddystone, de entre los cuales figuraban cales procedentes de Alberthaw en Glamorgan (Brydostone) próximo a Plymouth, y de la localidad de Portland.

El criterio experimental de selección consistió en fabricar unas esferas de unos cinco centímetros de diámetro con los conglomerantes amasados con agua; las introducía en agua y determinaba su endurecimiento cualitativamente. El resultado fue que las que tenían mayor dureza eran las fabricadas con calizas más impuras; mientras que las de color más claro, de más pureza, resistían menos la acción del agua.

Asimismo, determinó el residuo arcilloso que la caliza calcinada dejaba al ser atacada por ácido nítrico y atribuyó la capacidad hidráulica a la presencia de arcilla determinada cualitativamente por dicho residuo. Esta arcilla debía reaccionar de alguna forma con la cal hidráulica obtenida a elevada temperatura (por calcinación) para dar compuestos, no determinados aún, que

podrían ser los responsables de su comportamiento durable en el agua. Según el químico Wilhelm Michaelis, este descubrimiento es la base del conocimiento moderno de los morteros hidráulicos. En 1756, Smeaton publicó estos datos, indicando que esperaba poder obtener un cemento con un endurecimiento análogo al de la piedra de Portland, tan estimada por su solidez y durabilidad.

Por entonces, desde los descubrimientos de Smeaton, se progresó poco y durante mucho tiempo mantuvieron la supremacía las viejas mezclas de cal, grasa y puzolana, base de los morteros romanos. El material de Smeaton estaba formado por una mezcla de cal, puzolana y yeso que, en realidad, se trataba de un «cemento romano» mejorado. Gradualmente, se desarrollaron las calces hidráulicas y empezaron a fabricarse algunos cementos naturales estudiando el comportamiento de varios productos naturales. James Parker fabrica en 1796 en el Reino Unido con el nombre de «cemento romano» y «cemento rápido», un cemento obtenido por cocción a temperatura moderada de calizas arcillosas muy ricas en sílice y alúmina.

Louis-Joseph Vicat (1786-1861), químico francés, comenzó en 1812, unas investigaciones sobre las condiciones que daban origen a la hidraulicidad que publicó en 1818. Vicat confirmó los estudios de Smeaton y dio el nombre de hidráulicas a este tipo de calizas que endurecían bajo el agua; llegó a la conclusión de que la sílice y la alúmina, que eran los elementos que procedían de la arcilla, daban estas propiedades hidráulicas y que se obtenía el mismo resultado con una mezcla de una caliza pura con una arcilla que con una marga natural, como sucedía con las empleadas por Smeaton.

El sistema de fabricación que empleó Vicat fue el de vía húmeda, en el que se mezclan en proporciones adecuadas calizas con arcillas y se muelen conjuntamente en húmedo, y de esta forma marcó el inicio del actual proceso de fabricación. En 1819, el holandés Johann Friedrich John (1782-1847) llegó a la misma conclusión sobre las mezclas artificiales de caliza natural y un 25-30% de 9 arcilla, las cuales eran las óptimas para la producción de cales hidráulicas.

La fabricación de estos nuevos materiales parece ser que comenzó alrededor de 1811 con Frost, en Swanscome, mezclando dos partes de creta con

una de arcilla; Aspdin, en Wakefield; Gateshead, en Tyne y L.C. Johnson, en Rochester. De inmediato tuvo gran difusión en otros lugares. Aspdin obtuvo en 1824 una patente en la que figuraba por primera vez el nombre de cemento portland dado al producto obtenido por calcinación. El conglomerante producido en 1824 por Joseph Aspdin al calcinar una mezcla artificial de caliza y arcilla, se correspondía con la cal romana en su composición y propiedades ya que la mezcla no había sido calentada hasta su sinterización.

William Aspdin (1815-1864), el hijo de Joseph Aspdin, inició la producción de cemento portland en 1843, en su recién instalada planta de Rotherhithe, cerca de Londres. Este cemento resultó ser muy superior al cemento romano debido a la mayor temperatura de calcinación que producía una sinterización parcial de la mezcla cruda. El ejemplo más significativo de aplicación es el Parlamento de Londres. Por tanto, William Aspdin es considerado el primer productor de cemento portland moderno. Sin embargo, la base del cemento moderno a escala industrial, con una base más científica, fue establecida en 1844 por Isaac Charles Johnson (1811-1911) al emplear temperaturas suficientemente altas para clinkerizar la mezcla de arcilla y caliza.

La fabricación de material calcinado a más alta temperatura daba un producto escorificado de color más oscuro, el cual tenía un endurecimiento más lento, con mayor hidraulicidad y alcanzaba resistencias mucho más elevadas. Es decir, observaron que los nódulos sobrecocidos encontrados en los hornos, aunque fraguaban lentamente después de molidos, daban un cemento mejor que el producto normalmente fabricado. Johnson mejoró las proporciones de caliza y arcilla y elevó la temperatura de trabajo de los hornos, recomendando llegar a un principio de sinterización.

Al producto así obtenido se le dio el nombre de «cemento portland», porque una vez fraguado, presentaba un color similar a la piedra de Portland, una caliza oolítica que se extraía en la costa del canal de Portland, en Dorsetshire, al sur de Inglaterra. Este producto, que en un principio fue desechado, no era sino un clínker 10 muy próximo al actual portland.

En 1838, Brunel, en la obra del túnel bajo el Támesis, empleó un conglomerante con el nombre de cemento portland. Wilhelm Michaelis (1840-1911) describió por vez primera en su libro «el mortero hidráulico», publicado

en 1868, la composición óptima de la mezcla de material crudo y estudió el contenido máximo de óxido de calcio en la mezcla de material crudo que consigue reaccionar con  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  a temperaturas de sinterización (módulo hidráulico).

El cemento portland sigue desarrollándose y, en 1893, la teoría del fraguado de Le Chatelier (teoría coloide) es criticada por Michaelis (teoría cristaloides). Ambas teorías son aceptadas en la actualidad y son la base de las teorías de la hidratación del cemento.

El primer cemento portland español se produjo en Asturias en la fábrica de Tudela Veguín en 1898; en 1900, se fundó la Sociedad Comanditaria Hijos de J. M. Rezola y en 1901 se fundó la Compañía General de Asfaltos y Portland Asland, S.A. A su vez, la Sociedad de Cementos Portland de Pamplona se instaló en Olazagutía en 1905. En el año 1909, las fábricas españolas producían 100.000 toneladas anuales y en 1940 la producción ya era de 400.000 toneladas anuales.

En el año 2007, se llegó al máximo histórico de 47 millones de toneladas y, desde entonces, la producción ha caído en picado hasta los 26,1 millones de 2010, los 15,8 millones de 2012 y los 10 millones de 2013. En Alemania, el primer cemento portland se produjo en 1850 en Buxtehude, cerca de Hamburgo. La producción de cemento portland en Francia comenzó en 1850. En los Estados Unidos, David Saylor produjo por primera vez clínker de cemento sinterizado en 1870.

En resumen, en Europa, el empleo de cementos naturales (en algunos casos sometidos a tratamientos térmicos primarios) en construcción se remonta a la antigüedad (p.e. mortero romano). El cemento portland fue patentado en 1824, y es el cemento más ampliamente empleado en nuestros días para fabricar hormigón. En la actualidad existen más de 1500 fábricas de cemento repartidas por todo el mundo y la producción en el año 2000 fue de unos 1500 millones de toneladas, mientras que en el año 2011 fue de más de 3600 millones de toneladas.



Desde las adiciones de cemento, la extracción de estos minerales se hace en canteras, que preferiblemente deben estar próximas a la fábrica. Con frecuencia los minerales ya tienen la composición deseada; sin embargo, en algunos casos es necesario agregar arcilla, o bien carbonato de calcio, o bien minerales de hierro, bauxita, u otros minerales residuales de fundiciones.

La mezcla es calentada en un horno especial, con forma de un gran cilindro (llamado kiln) dispuesto casi horizontalmente, con ligera inclinación, que rota lentamente. La temperatura aumenta a lo largo del cilindro hasta llegar a unos 1400 °C, que hace que los minerales se combinen, pero sin que se fundan o vitrifiquen.

En la zona de menor temperatura, el carbonato de calcio (calcáreo o caliza) se disocia en óxido de calcio y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). En la zona de alta temperatura el óxido de calcio reacciona con los silicatos y forma silicatos de calcio (Ca<sub>2</sub>Si y Ca<sub>3</sub>Si). Se forma también una pequeña cantidad de aluminato tricálcico (Ca<sub>3</sub>Al) y ferroaluminato tetracálcico (Ca<sub>4</sub>AlFe). El material resultante es denominado clínker. El clínker puede ser conservado

durante años antes de proceder a la producción del cemento, con la condición de que no entre en contacto con el agua.

### **1.3. Planteamiento Del Problema**

La industria de la construcción presenta grandes retos. Por tal motivo, es necesario desarrollar nuevas tecnologías en la elaboración de concretos de calidad superior, prolongada vida útil y resistencia permitiendo edificaciones que cumplan sus objetivos estructurales y arquitectónicos. La aplicación del concreto es muy extensa en el sector construcción, por ser económico, muy trabajable y tener la capacidad de amoldarse a cualquier diseño, entre otras características.

El cemento Portland usado en la actualidad debe soportar grandes fuerzas de compresión uniaxial, es por tal motivo que para su elaboración se ha usado materiales que tengan muy buenas propiedades mecánicas.

Es por tales motivos que esta investigación estará enfocada en el proceso de fabricación y composición química del cemento Portland, que debido a su estructura molecular y las propiedades químicas que este presenta, los componentes que posee influyen directamente en la dureza del cemento. Si llegáramos a investigar más aspectos relacionados a este tema, mejoraríamos las propiedades mecánicas del cemento Portland tipo I lograríamos tener un cemento de mejor calidad a un bajo costo de producción.

La energía necesaria para producir el clínker es de unos 1700 julios por gramo, pero a causa de las pérdidas de calor el valor es considerablemente más elevado.

Esto comporta una gran demanda de energía para la producción del cemento y, por tanto, la liberación de gran cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera, un gas de efecto invernadero.

Para mejorar las características del producto final al clínker se agrega aproximadamente el 2 % de yeso (aljez) y la mezcla es molida finamente. El polvo obtenido es el cemento preparado para su uso.

#### **1.4. Justificación**

Esta investigación va dirigida a los estudiantes universitarios que bien por ser parte de una de las materias de sus estudios o bien por tener interés en incrementar su conocimiento en el campo del cemento puedan comprender de manera sencilla esta introducción a la fabricación y expedición del cemento, también va dirigido a todos aquellos interesados en el tema a presente.

Esta investigación busca motivar en los estudiantes la disciplina por el rigor científico y articular la competencia y la necesidad investigativa pasando de un proceso de resistencia a uno de sociabilización del hecho que la creatividad guiada genera bienestar social y uso efectivo de recursos naturales y tiempo.

## **1.5. Objetivo General**

Generar un documento con aportes científicos compilatorios de punta, en relación al proceso de fabricación y composición química del cemento Portland que se convierta en una herramienta para las tomas adecuadas en el uso del concreto y que sirva como un rastreo documental del cemento portland en el formato de rigor científico presentando un protocolo y posteriormente una tesis de licenciatura.

### ***1.5.1.- Objetivos Específicos***

- Identificar los componentes especiales del cemento portland
- Analizar las características específicas y su tipología
- Determinar las variables que integran este tipo de concretos
- Realizar búsquedas de documentos científicos y aportes en relación al cemento Portland
- Analizar los resultados obtenidos del experimento mediante el uso de herramientas adecuadas

## **CAPÍTULO II.-MARCO TEÓRICO**

### **2.1.-Proceso De Fabricación Y Composición Química Del Cemento Portland.**

#### ***2.1.1. El cemento Portland***

El cemento es un material básico para la edificación y la ingeniería civil. Su principal propiedad es la de formar masas pétreas resistentes y duraderas cuando se mezcla con áridos y agua. El endurecimiento de la mezcla ocurre transcurrido un cierto tiempo desde el momento en que se realiza la mezcla, lo que permite dar forma (moldear) la piedra artificial resultante. Estas tres cualidades (moldeable, resistente, duradera) hacen que los productos derivados del cemento tengan una gran aplicación en la construcción de infraestructuras y otros elementos constructivos.

El cemento portland es un polvo finamente molido, compuesto principalmente por silicatos de calcio y, en menor proporción, por aluminatos de calcio, que, mezclado con agua se combina, fragua y endurece a temperatura ambiente, tanto al aire como bajo el agua. Los romanos ya utilizaban un cemento natural para unir las piedras. Empleaban una mezcla de cal y materiales

procedentes de las cercanías de Pozzuoli, junto al Vesubio. De ahí, la denominación de puzolanas que damos actualmente a los materiales que se comportan de forma similar.

Louis Joseph Vicat, en 1812, preparó una cal artificial calcinando una mezcla íntima de caliza y arcilla molidas conjuntamente en húmedo y, en 1818, explica de manera científica el comportamiento de estos «conglomerantes». Al producto lo denomina cal hidráulica. Con dicha cal construyó el primer puente sobre el río Dordoña. En 1824, Joseph Aspdin patenta el cemento portland, fabricado de modo similar al descrito por Vicat. La evolución tecnológica del cemento portland que se ha producido desde la aparición de la patente de Aspdin hasta nuestros días, ha sido extensa.

### ***2.1.2. Qué Se Conoce Como Cemento Portland En La Actualidad***

Los cementos según la norma europea UNE-EN 197-1:2011, «son conglomerantes hidráulicos, esto es, materiales artificiales de naturaleza inorgánica y mineral, que finamente molidos y convenientemente amasados con agua forman pastas que fraguan y endurecen a causa de las reacciones de

hidrólisis e hidratación de sus constituyentes, dando lugar a productos hidratados mecánicamente resistentes y estables, tanto al aire como al agua».

Este endurecimiento hidráulico se debe principalmente a la formación de silicatos cálcicos hidratados y de aluminatos hidratados como resultado de la reacción entre el agua y los constituyentes del cemento. Esta propiedad de conglomerante hidráulico le ha convertido en un material básico en la construcción, imprescindible para la edificación y la realización de infraestructuras.

Las teorías acerca de la constitución del cemento portland y de las combinaciones que lo integran han sido muchas y diversas. Con los medios actuales se han podido verificar algunas de estas teorías y rechazar otras. Le Chatelier sostenía que el elemento primordial del cemento portland era el silicato tricálcico  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  (C3S), viendo en dicho compuesto la causa del fraguado y considerando como impurezas a los aluminatos que lo acompañaban. Törnebohm observó con el microscopio cinco minerales diferentes que denominó Alita, Belita, Celita, Felita y residuo vítreo; y de acuerdo con Le



Chatelier, la Alita, cuyas propiedades correspondían con las del silicato tricálcico, era la causa del fraguado y endurecimiento del cemento portland.

Michaelis, en un principio acepta la hipótesis de Le Chatelier, pero más tarde desarrolla otra teoría con respecto al fraguado y endurecimiento de los conglomerantes hidráulicos. Según Michaelis, no se producen combinaciones cristalizadas; la sílice se halla en estado coloidal y desempeña un papel análogo al que realizan las colas; por tanto, el endurecimiento se produciría como consecuencia de la desecación de la sílice. Esta teoría difiere poco de la previa de Marceron y Vicat.

En los últimos trabajos, Michaelis coincide con Day y Shepherd en que el ortosilicato cálcico ( $2\text{CaO SiO}_2$ ), es el principal componente del cemento portland. Cree que el silicato tricálcico es una solución sólida de CaO en  $2\text{CaO SiO}_2$  (C2S) y acepta la existencia de las tres variedades de silicato bicálcico a, b y g. Atribuye la disgregación de los cementos a la transformación de la variedad a en la g, cosa que ocurre en los cementos de escorias mantenidos mucho tiempo a elevada temperatura.

Asimismo, Walter Dyckerhoff afirma que el cemento portland se compone esencialmente de silicato bicálcico en el que admite la existencia de las tres variedades a, b y g. Sólo la modificación b tiene propiedades hidráulicas, pero es inestable por debajo de 675°.

Sin embargo, al fabricarse el cemento, los aluminatos y ferritos cálcicos forman un baño fundido que envuelve y protege los cristales de silicato, impidiendo su degradación al tipo g que disgregaría el cemento. Newberry coincide con la idea de Le Chatelier de que en el cemento portland, el baño conglomerante es una sustancia no cristalina que prácticamente contiene todo el hierro y la alúmina y es de composición variable.

En cambio, disiente de Le Chatelier en apreciar que el aluminato que más importancia tiene en el clínker del cemento portland no es el  $3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$  (C3A) sino el  $2\text{CaO Al}_2\text{O}_3$  (C2A). Zulkowski, sostiene que el silicato tricálcico  $3\text{CaO SiO}_2$  (C3S) no existe pero acepta dos formas de silicato bicálcico  $2\text{CaO SiO}_2$  (C2S); una estable (un ortosilicato) y otra inestable (metasilicato). Sólo el

metasilicato tiene propiedades hidráulicas mientras que el ortosilicato es el causante de la disgregación del cemento.

El silicato inestable puede estabilizarse a baja temperatura mediante un enfriamiento rápido que evita la transformación total o parcial en su isómero. Otto Schott estudió las propiedades de los silicatos, aluminatos, ferritos cálcicos y dedujo que el silicato cálcico está sujeto siempre a fenómenos de expansión, y que, por consiguiente, si entra en la composición del cemento portland, tiene que hacerlo en una dosis mínima. Cree que el clínker portland es una solución sólida de cal en aluminato bicálcico  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  (C<sub>2</sub>S); sus propiedades hidráulicas mejoran en función de la cantidad de cal disuelta que contiene.

En cuanto a la composición química de los cementos de principio del siglo XX, poco varía de la composición actual que se da a continuación:

Parámetro	Rango aproximado
Residuo insoluble	0,1 – 1,4
Óxido de calcio (CaO)	58,2 – 65,6
Sílice (SiO <sub>2</sub> )	19,8 – 26,45
Alúmina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	4,1 – 9,5
Óxido de hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	2,1 – 4,5
Magnesia (MgO)	trazas – 2,9
Alcalis (K <sub>2</sub> O, Na <sub>2</sub> O)	0,1 – 2,8
Sulfatos (SO <sub>3</sub> )	0,1 – 2,2
Pérdida por calcinación	0,2 – 2,8

COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS CEMENTOS (% EN MASA)

A continuación se muestra una lista de la clasificación de cementos Portland normalizados bajo normas IRAM:

- Cemento portland normal
- Cemento portland con “filler” calcáreo
- Cemento portland compuesto
- Cemento portland con escoria
- Cemento de alto horno
- Cemento portland puzolánico
- Cemento portland de alta resistencia inicial
- Cemento portland moderadamente resistente a los sulfatos
- Cemento portland altamente resistente a los sulfatos
- Cemento portland de bajo calor de hidratación

- Cemento portland resistente a la reacción álcali – agregado
- Cemento portland blanco

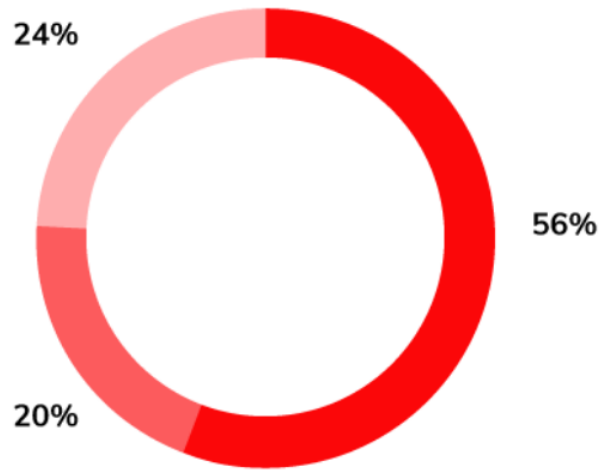
A continuación, se muestra una selección del tipo de cemento

Los cementos enumerados anteriormente pueden clasificarse, entre otras formas, por:

- Uso (cementos de uso general o con propiedades especiales)<sup>2</sup>.
- Composición (cementos con adiciones o sin adiciones)<sup>3</sup>.
- Nivel de resistencia (categorías CP30, CP40 o CP50)

### **2.1.3. Canales de distribución**

El uso principal del cemento es para hacer concreto, con dos tipos principales: Concreto Premezclado o Concreto Prefabricado.



El concreto premezclado 56%

El hormigón prefabricado 20%

Otros 24%

El concreto premezclado se produce en una planta de lotes de concreto premezclado y se distribuye mediante camiones mezcladores a los sitios de construcción.

El concreto prefabricado (prefabricado) es el segundo tipo principal y se vierte en un molde reutilizable que luego se cura en un entorno controlado y se transporta al sitio de construcción donde se puede colocar inmediatamente en

su lugar. Esta producción en condiciones estandarizadas que requieren únicamente el ensamblaje de elementos prefabricados en el lugar de trabajo permite la aplicación en condiciones climáticas menos favorables. Por lo tanto, el uso de elementos prefabricados de hormigón varía mucho según la región.

Las descripciones del proceso de producción, fotografías e imágenes se pueden encontrar en los sitios web de nuestros miembros , así como en las asociaciones europeas y nacionales de concreto premezclado y prefabricado .

El 24% restante del cemento es consumido por:

- **Minoristas y mayoristas** (cemento en sacos para mortero y pequeños lotes de hormigón, suministro a pequeños contratistas y particulares).
- **Contratistas** que producen su propio hormigón.
- **Morteros**, húmedos y secos, para la mayoría de las grandes obras de construcción.

Por último, algunos usos de nicho incluyen cementos utilizados en la perforación (petróleo) para la estabilización de pozos y cementos para la inmovilización de rellenos en terraplenes de vertederos.

Según el INEGI en 2015 la industria mexicana produjo, 44.9 millones de toneladas de cemento y por primera vez en 10 años, logró crecer a una tasa del 7%.

- Cemento Portland Ordinario (CPO)

Es excelente para construcciones en general, zapatas, columnas, trabes, castillos, dalas, muros, losas, pisos, pavimentos, guarniciones, banquetas; así como para la elaboración de productos prefabricados.

- Cemento Portland con “filler” calcáreo (CPF)

Es utilizado en la construcción cuando el concreto no presenta requerimientos especiales. La característica más valorada de este material es la buena trabajabilidad que le confiere a los morteros y concretos en estado fresco, aunque puede presentar menor resistencia.



- Cemento Portland Puzolánico (CPP)

Suelen ser más “lentos” al desarrollar su resistencia, debido a la puzolana (roca volcánica muy fragmentada y de composición basáltica).

Especialmente diseñado para obras sobre suelos salinos o expuestas a ambientes químicamente agresivos.

- Cemento portland con escoria (CPE)

Es un cemento con contenido de escoria “moderado” ya que presenta mayor contenido que el cemento portland normal y menor que el cemento de escoria de alto horno.

#### **2.1.4. Proceso de fabricación del cemento**

La fabricación del cemento es un proceso industrial que se realiza en instalaciones de gran escala. Básicamente, la fabricación de cemento consiste en:

- a. Obtención, almacenamiento y preparación de materias primas (caliza, marga, arcilla) que son finamente molidas para obtener el crudo.

- b. Almacenamiento y preparación de combustibles
- c. Cocción del crudo en un horno rotatorio hasta temperaturas de 1.450°C (2.000°C de temperatura de llama) para la obtención de clínker de cemento.
- d. Molienda conjunta del clínker con otros componentes (cenizas volantes, escoria, puzolana natural, yeso, etc.) para obtener el cemento.
- e. Almacenamiento, ensacado y expedición de cemento.



El cemento se fabrica generalmente a partir de materiales minerales calcáreos, tales como la caliza, y por alúmina y sílice, que se encuentran como arcilla en la naturaleza. En ocasiones es necesario agregar otros productos para mejorar la composición química de las materias primas principales; el más común es el óxido de hierro.

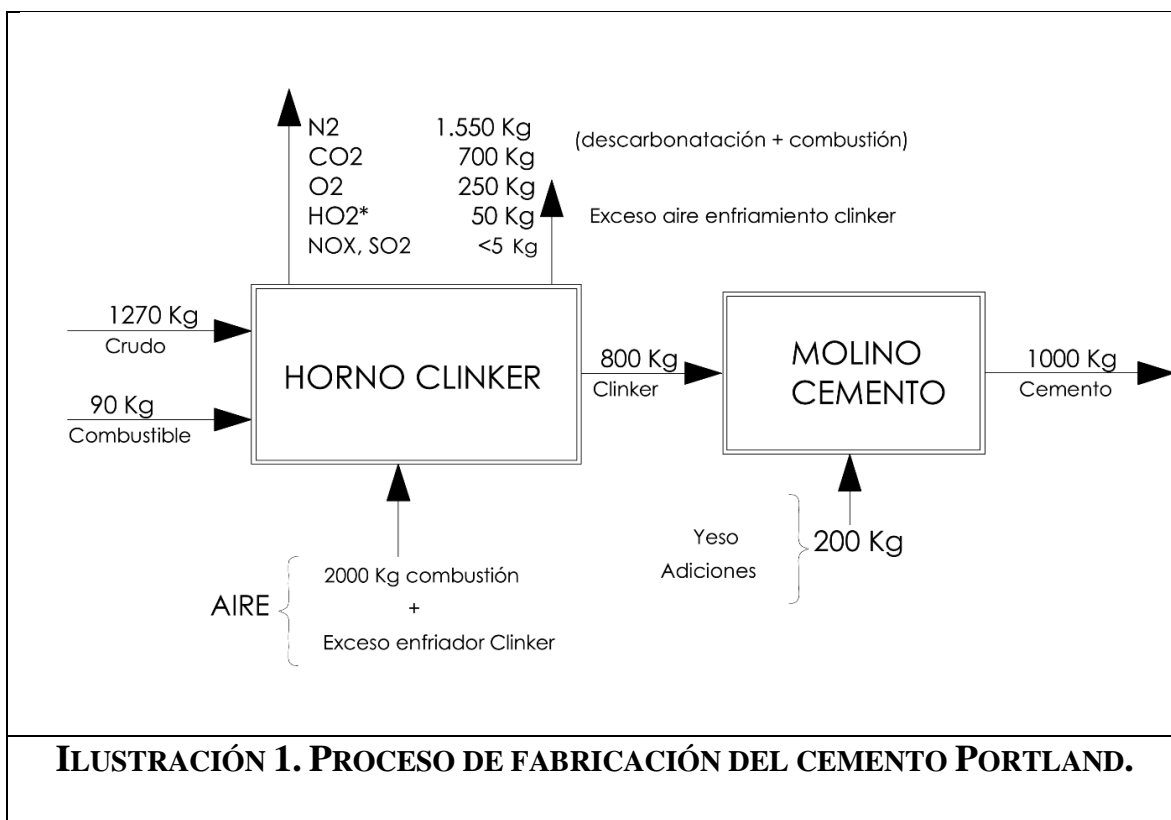
Las calizas, que afortunadamente se presentan con frecuencia en la naturaleza, están compuestas en un alto porcentaje (más del 60%) de carbonato de calcio o calcita ( $\text{CaCO}_3$ , cuando se calcina da lugar a óxido de calcio,  $\text{CaO}$ ), e impurezas tales como arcillas, sílice y dolomita, entre otras. Hay diferentes tipos de caliza y prácticamente todas pueden servir para la producción del cemento, con la condición de que no tengan cantidades muy grandes de magnesio, pues si el cemento contiene más cantidades del límite permitido, el concreto producido con él, aumenta de volumen con el tiempo, generando fisuras y por lo tanto pérdidas de resistencia.

Las pizarras son las arcillas constituidas principalmente por óxidos de silicio de un 45 a 65%, por óxidos de aluminio de 10 a 15%, por óxidos de fierro

de 6 a 12% y por cantidades variables de óxido de calcio de 4 a 10%. Las pizarras representan aproximadamente un 15% de la materia prima que formara el clinker.

La arcilla que se emplea para la producción de cemento está constituida por un silicato hidratado complejo de aluminio, con porcentajes menores de hierro. La arcilla aporta al proceso los óxidos de sílice ( $\text{SiO}_2$ ), hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

El yeso, sulfato de calcio hidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), es un producto regulador del fraguado, que es un proceso de endurecimiento que, del cemento, y lo que el yeso hace es retardar el proceso para que al obrero le dé tiempo de preparar el material. Este se agrega al final del proceso de producción.



### 2.1.5. Componentes Del Cemento Portland

La norma europea UNE-EN 197-1:2011 define los posibles componentes que en la actualidad pueden formar parte de un cemento portland. Los requisitos de los componentes especificados se determinarán siguiendo los métodos de ensayo descritos en las normas UNE-EN 196. Básicamente, dichos componentes pueden clasificarse en principales y minoritarios adicionales.

- Componentes principales: Clínker de cemento portland (K) El clínker de cemento portland se obtiene por sinterización de una mezcla homogénea de materias primas: caliza, arcilla, arena, compuestos de hierro y otros componentes en proporciones definidas (crudo, pasta o harina) conteniendo elementos, normalmente expresados en forma de óxidos, CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y pequeñas cantidades de otras materias. Esta mezcla se calienta hasta llegar a los rangos de la temperatura de sinterización y se forman nuevos compuestos. El clínker aparece paulatinamente.

El clínker de cemento portland es un material hidráulico que debe estar constituido al menos en dos tercios de su masa por silicatos de calcio [3CaO.SiO<sub>2</sub>] y [2CaO.SiO<sub>2</sub>], estando constituido el resto por fases del clínker conteniendo aluminio, hierro y por otros compuestos. La relación en masa (CaO)/(SiO<sub>2</sub>) no será menor de 2,0 y el contenido de óxido de magnesio (MgO) no excederá del 5,0 % en masa.

### 2.1.6. Obtención Y Preparación De Materias Primas.

El proceso de fabricación del cemento se inicia con los estudios y evaluación minera de materias primas (calizas y arcillas) necesarias para conseguir la composición deseada de óxidos metálicos para la producción del clínker. Una vez evaluada se tramita la concesión o derechos sobre la cantera.

El clínker se compone de los siguientes óxidos:

Óxidos componentes del clínker	Porcentaje %
Oxido de calcio “Cal” (CaO)	60-69
Oxido de silicio “Sílice”	18-24
Oxido de aluminio “Alúmina” (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	4-8
Óxido de hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1-8

**TABLA 1. COMPOSICIÓN DE ÓXIDOS EN CLÍNKER.**

La obtención de la producción adecuada de los distintos óxidos se realiza mediante la dosificación de los minerales de partida:

- Caliza y marga para el aporte de CaO

- Arcilla y pizarras para el aporte del resto de óxidos

Se planifica la explotación y se da inicio al proceso: de perforación, quema, remoción, clasificación, cargue y transporte de materia prima.



**ILUSTRACIÓN 2. CANTERA.**

Las materias primas esenciales (caliza, margas y arcilla) que son extraídas de canteras, en general próximas a la planta, deben proporcionar los elementos esenciales en el proceso de fabricación de cemento: calcio, silicio, aluminio y hierro.



Las calizas pueden ser de dureza elevada, de tal modo que exijan el uso de explosivos y luego trituración, o suficientemente blandas como para poderse explotar sin el uso de explosivos.

El material resultante de la explosión es transportado en camiones para su trituración, los mismos que son cargados mediante palas o cargadores frontales de gran capacidad.

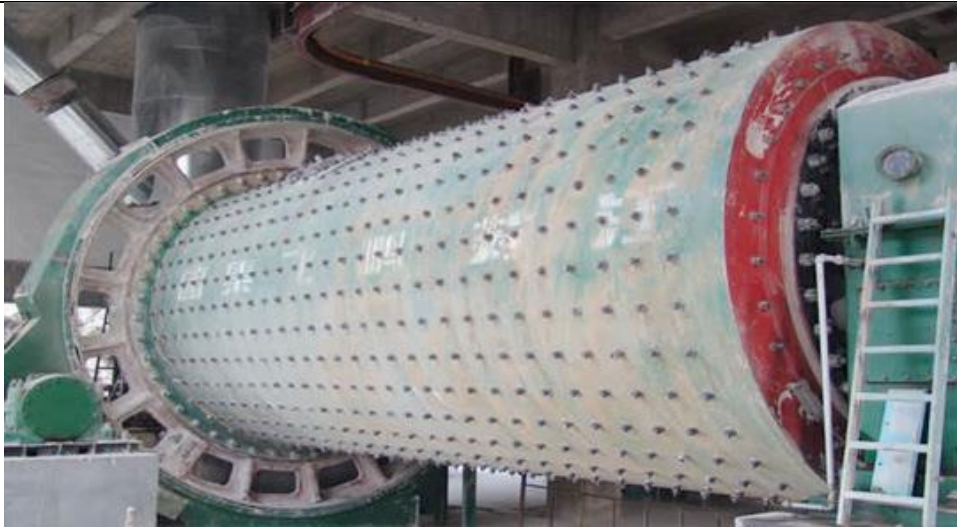
Las materias primas naturales son sometidas a una primera trituración, en cantera o a su llegada a la fábrica de cemento donde se descargan para su almacenamiento.

La trituración de la roca se realiza en dos etapas, inicialmente se procesa en una chancadora primaria, del tipo cono que puede reducirla de un tamaño máximo de 1.5m hasta los 25cms. El material se deposita en un parque de almacenamiento. Seguidamente, luego de verificar su composición química, pasa a la trituración secundaria, reduciéndose a 2mm.

El material triturado se lleva a la planta propiamente dicha por cintas transportadoras, depositándose en un parque de materias primas. En algunos casos se efectúa un proceso de pre-homogeneización.

La pre-homogeneización realizada mediante diseños adecuados del apilamiento y la extracción de los materiales en los almacenamientos reduce la variabilidad de estos.

Este material es transportado y almacenado en un silo del cual se alimenta el molino de crudo. Allí mismo se tienen dos silos más con los materiales correctivos (minerales de hierro y caliza correctiva alta). Se dosifica dependiendo de sus características; y mediante básculas el material al molino de harina (o crudo).



**ILUSTRACIÓN 3. MOLINO DE CRUDO.**

### ***2.1.7. Los Conglomerantes Y El Cemento.***

Se utiliza el término conglomerante para definir a toda una variedad de materiales capaces de adherirse a otros y dar cohesión al conjunto, por efectos de transformaciones químicas que se producen en su masa y que originan un nuevo conjunto, entre ellos, se encuentra el cemento portland. Dicho cemento entra en la categoría de conglomerantes hidráulicos, que son aquellos que amasados con agua endurecen al aire o bajo agua. En general, el proceso de fabricación de los conglomerantes consta, en síntesis, de un proceso térmico de las mezclas adecuadas de materias primas y, posteriormente, de una molienda fina de los materiales resultantes de la cocción con o sin adiciones.

Los conglomerantes se clasifican en dos grupos:

- Conglomerantes aéreos:

Son los que mezclados con agua fraguan y endurecen en el aire, no siendo resistentes al agua. Los conglomerantes no hidráulicos precisan de agentes externos para endurecer, como la cal, que requiere la presencia del anhídrido carbónico, presente en la atmósfera para formar carbonato cálcico.

- Conglomerantes hidráulicos:

Éstos, después de ser amasados con agua, fraguan y endurecen tanto al aire como sumergido en agua, siendo los productos resultantes estables en ambos medios. Por fraguado se entiende la trabazón y consistencia inicial de un conglomerante; una vez fraguado, el material puede seguir endureciéndose.

El Cemento a diferencia del yeso, raras veces se utiliza el cemento solo, amasado con agua y formando una pasta pura. Su uso habitual es en combinación con otros materiales, especialmente con áridos para formar

morteros y hormigón. Amasado con agua, el cemento fragua y endurece tanto en el aire como sumergido en agua. Se trata, por consiguiente, de un conglomerante hidráulico. El más conocido y el más utilizado de todos los cementos es el cemento portland. Este material es el objeto del presente libro, por lo que se desarrollará en los apartados siguientes.

### ***2.1.8. Molienda Y Cocción De Materias Primas.***

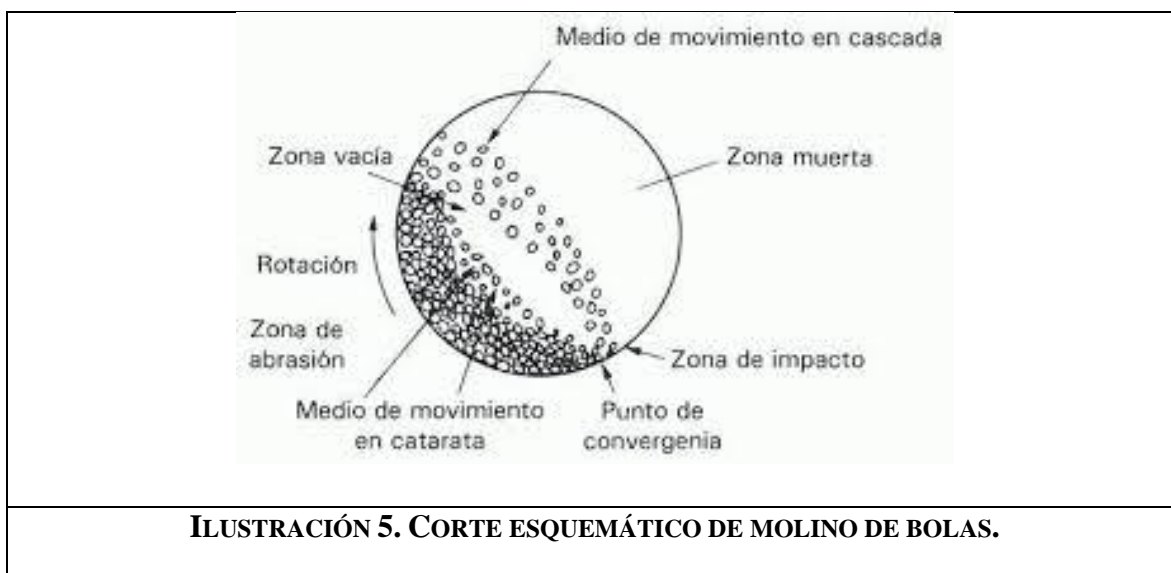
Esta etapa comprende la molienda de materias primas (molienda de crudo), por molinos de bolas, por prensas de rodillos o a fuerza de compresión elevadas, que producen un material de gran finura.



**ILUSTRACIÓN 4. MOLINO DE CRUDO DE RODILLOS.**

En este proceso se efectúa la selección de los materiales, de acuerdo con el diseño de la mezcla previsto, para optimizar el material crudo que ingresara al horno, considerando el cemento de mejores características.

Con la molienda se logra reducir el tamaño de las partículas de materias para que las reacciones químicas de cocción en el horno puedan realizarse de forma adecuada. El molino muele y pulveriza los materiales hasta un tamaño medio de 0.05mm.



El material molido debe ser homogeneizado para garantizar la efectividad del proceso de clinkerización mediante una calidad constante. Este procedimiento se efectúa en silos de homogeneización. El material resultante

constituido por un polvo de gran finura debe presentar una composición química constante.

El horno debe recibir una alimentación químicamente homogénea. Esto se consigue mediante el control de la correcta dosificación de los materiales que forman la alimentación al molido crudo. Si se parte de materiales variables en calidad, previamente se consigue su pre-homogeneización en una instalación “ad-hoc”. Después del molido, el crudo sufre aun un proceso de homogeneización final, que asegura una mezcla homogénea con la composición química requerida.

Además de la homogeneidad química, es fundamental la finura y la curva granulométrica del crudo, lo que se consigue mediante el ajuste del separador que clasifica el producto que sale del molino, reintroduciéndose la fase no suficientemente molida.

**a. Cemento Portland: El Horno.**

El proceso de la fabricación del cemento empieza con la descomposición del carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ ) a unos  $900^\circ\text{C}$  dando óxido cálcico ( $\text{CaO}$ ) y liberando dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ); este proceso se conoce como calcinación o des carbonatación. Sigue el proceso de clinkerización en el que el óxido de calcio reacciona a alta temperatura ( $1400 - 1500^\circ\text{C}$ ) con sílice, alúmina y óxido de hierro para formar los silicatos, aluminatos y ferritos de calcio que componen el clínker. El clínker se muele conjuntamente con yeso y otras adiciones para producir el cemento.

**b. Cemento Portland: Combustibles.**

Se pueden emplear diversos combustibles para proporcionar la energía térmica y la elección del combustible depende de la situación local. En Europa en orden decreciente de importancia son:

Coque de petróleo o carbón pulverizado (carbones bituminosos y lignitos); residuos orgánicos; fuelóleo pesado, gas natural.



### 2.1.9. Procesos De Fabricación Del Clinker.

El clinker de cemento portland se obtiene por sinterización de una mezcla homogénea de materias primas: caliza, arcilla, arena, compuestos de hierro y otros componentes en proporciones definidas (crudo, pasta o harina) conteniendo elementos, normalmente expresados en forma de óxidos, CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y pequeñas cantidades de otras materias. Esta mezcla se calienta hasta llegar a los rangos de la temperatura de sinterización y se forman nuevos compuestos.

El clinker aparece paulatinamente. La composición química del clinker se da en la Tabla 2. El clinker de cemento portland es un material hidráulico que debe estar constituido al menos en dos tercios de su masa por silicatos de calcio [3CaO.SiO<sub>2</sub>] y [2CaO.SiO<sub>2</sub>], estando constituido el resto por fases del clinker conteniendo aluminio, hierro y por otros compuestos. La relación en masa (CaO)/(SiO<sub>2</sub>) no será menor de 2,0 y el contenido de óxido de magnesio (MgO) no excederá del 5,0 % en masa.

Fase	Fórmula	Abreviatura	Rango	Valor medio
Silicato tricálcico	3CaO SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S	46-79	61
Silicato bicálcico	2CaO SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S	5 -30	15
Ferritoaluminato tetracálcico	4CaO (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	C <sub>4</sub> (A,F)	4-16	8
Aluminato tricálcico	3CaO Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A	6-18	12
Cal libre	CaO	C	0,1-4	1
Óxido de magnesio libre	MgO	M	0,7-1,5	1,5

COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL CLÍNKER (% EN MASA)

Se define clínker como el productora obtenido por fusión incipiente de materiales arcillosos y calizas que contengan oxido de calcio, silicio, aluminio y fierro en cantidades convenientemente calculadas.

El clínker es un producto intermedio en el proceso de elaboración de cemento. Una fuente de cal como las calizas, una fuente de sílice y alúmina como las arcillas y una fuente de óxido de hierro se mezclan apropiadamente, se muele finamente y se calcinan en un horno aproximadamente a 1500°C, obteniéndose el denominado clínker del cemento Portland.

La harina cruda es introducida mediante sistema de transporte neumático y debidamente dosificada a un intercambiador de calor por suspensión de gases de varias etapas, en la base del cual se instala un moderno sistema de precalcinación de la mezcla antes de la entrada al horno rotatorio donde se desarrollan las restantes reacciones físicas y químicas que dan lugar a la formación del clínker.

El intercambio de calor se produce mediante transferencias térmicas por contacto íntimo entre la materia y los gases calientes que se obtienen del horno, a temperaturas de 950 a 1100°C.

El horno es el elemento fundamental para la fabricación del cemento. Está constituido por un tubo cilíndrico de acero con longitudes de 40 a 60m y con diámetros de 3 a 6m, que es revestido interiormente con materiales refractarios, en el horno para la producción del cemento se producen temperaturas de 1500 a 1600°C, dado que las reacciones de clinkerización se encuentra alrededor de 1450°C. El clínker que egresa al horno de la temperatura de 1200°C pasa luego a un proceso de enfriamiento rápido por enfriadores de parrilla. Seguidamente por transportadores metálicos es llevado a una cancha de almacenamiento.

En función de cómo se procesa el material antes de su entrada en el horno de clínker, se distinguen cuatro tipos de proceso de fabricación: vía seca, vía semi-seca, vía semi-húmeda y vía húmeda. La tecnología que se aplica depende fundamentalmente del origen de las materias primas. El tipo de caliza y de arcilla y el contenido en agua (desde el 3% para calizas duras hasta el 20% para algunas margas), son los factores decisivos.

- a. Vía seca.
- b. Vía semi-seca.
- c. Vía semi-húmeda.
- d. Vía húmeda.

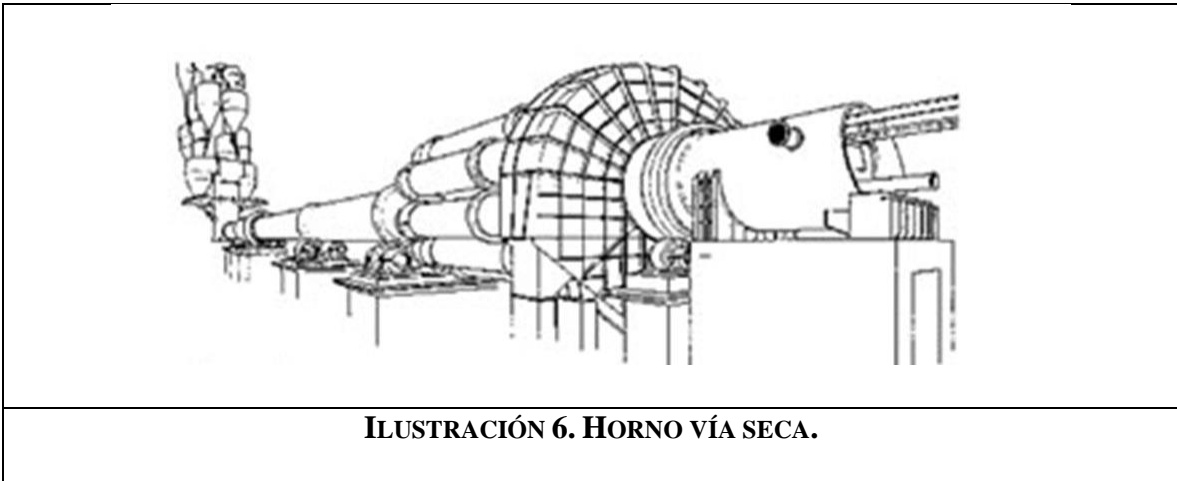
**a. Proceso de vía seca.**

El proceso de vía seca es el más económico, en términos de consumo energético.

La materia prima es introducida en el horno de forma seca y pulverulenta.

El sistema del horno comprende una torre de ciclones para intercambio de calor en la que se precalienta el material en contacto con los gases provenientes del horno.

El proceso de des carbonatación de la caliza (calcinación) puede estar casi completado antes de la entrada del material en el horno si se instala una cámara de combustión a la que se añade parte del combustible (precalcinador).



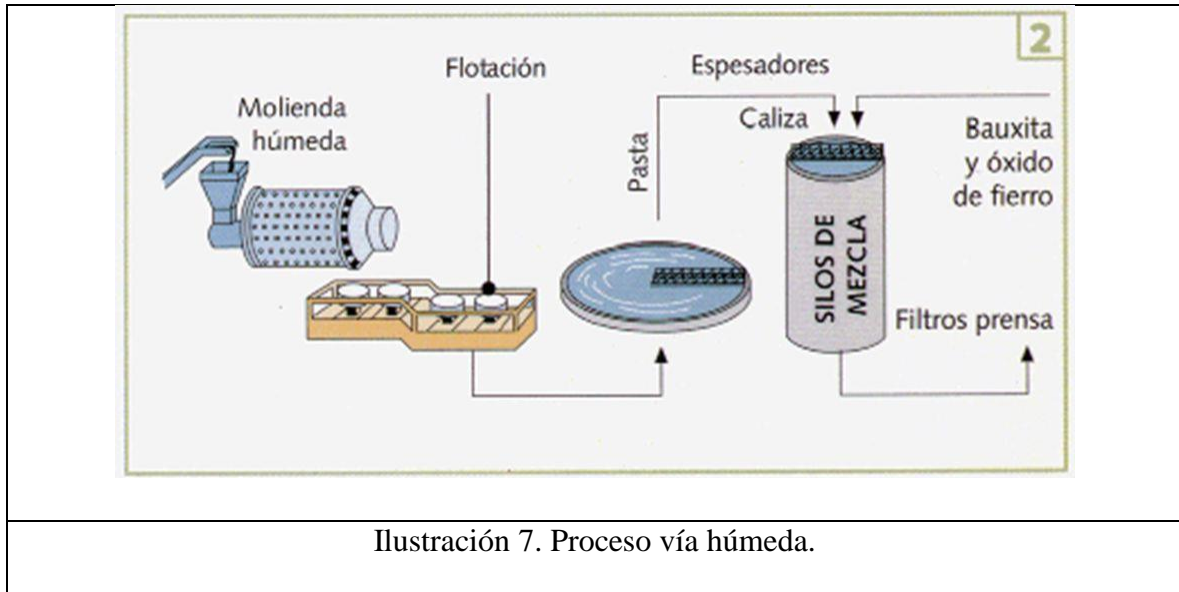
**b. Proceso de vía húmeda.**

Este proceso es utilizado normalmente para materias primas de alto contenido en humedad.

El material de alimentación se prepara mediante molienda conjunta del mismo con agua, resultando una pasta con contenido de agua de un 30-40% que es alimentada en el extremo más elevado del horno de clinker.

Si la arcilla es bastante húmeda y tiene la propiedad de desleírse en el agua, debe ser sometida a la acción de mezcladores para formar la lechada; esto se efectúa en un molino de lavado, el cual es un pozo circular con brazos

revolvedores radiales con rastrillos, los cuales rompen los aglomerados de materias sólidas.



**c. y d. Procesos de vía semi-seca y semi-húmeda.**

El material de alimentación se consigue añadiendo o eliminando agua respectivamente, al material obtenido en la molienda de crudo. Se obtienen “pellets” o gránulos con un 15-20% de humedad que son depositados en parrillas móviles a través de los cuales se hacen circular gases calientes provenientes del horno.

Cuando el material alcanza la entrada del horno, el agua se ha evaporado y la cocción ha comenzado. En todos los casos, el material procesado en el horno rotatorio alcanza una temperatura entorno a los 1450°C. Es enfriado bruscamente al abandonar el horno en enfriadores planetarios o de parrillas obteniéndose de esta forma el clínker.

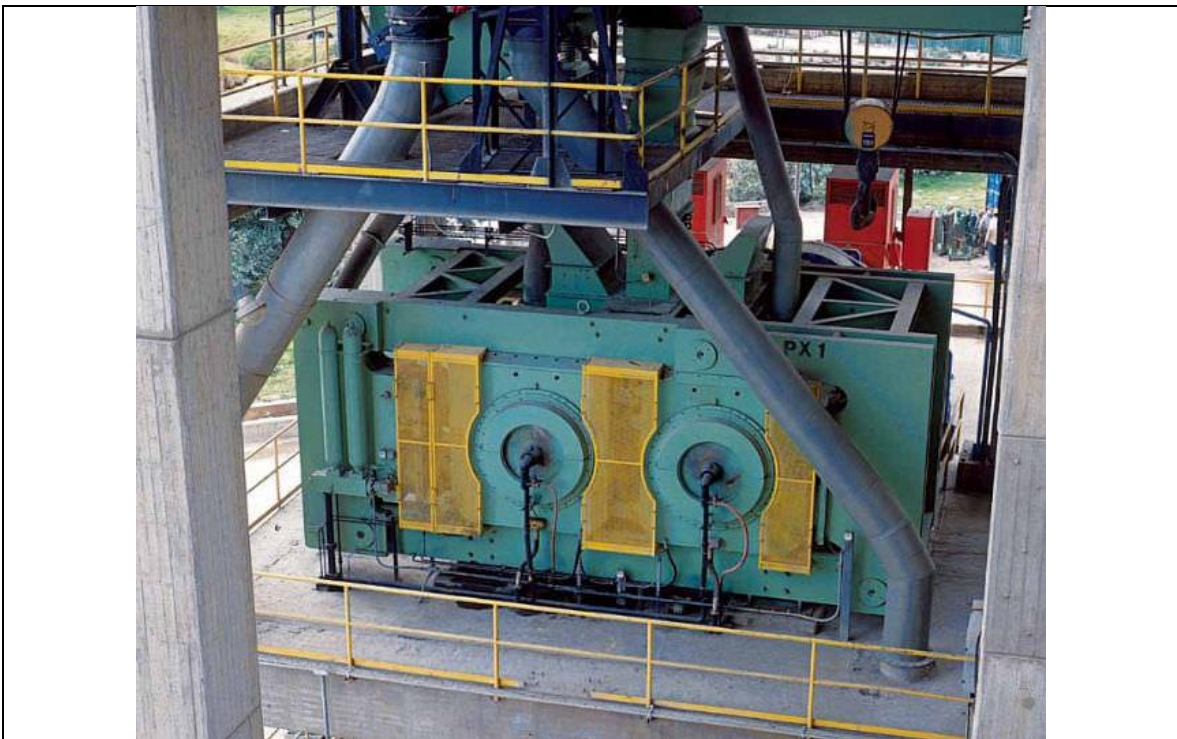
#### ***2.1.10. Molienda De Cemento.***

El proceso de fabricación de cemento termina con la molienda conjunta de clínker, yeso y otros materiales denominados “adiciones”.

Los materiales utilizables, que están normalizados como adiciones, son entre otros:

- Escorias de horno alto
- Humo de sílice
- Puzolanas naturales
- Cenizas volantes
- Caliza

En función de la composición, la resistencia y otras características adicionales, el cemento es clasificado en distintos tipos y clases. La molienda de cemento se realiza en equipos mecánicos en las que la mezcla de materiales es sometida a impactos de cuerpos metálicos o a fuerzas de compresión elevadas.



**ILUSTRACIÓN 8. PRENSA DE RODILLOS.**

Para ello se utilizan los siguientes equipos:

- Prensa de rodillos
- Molinos verticales de rodillos



- Molinos de bolas
- Molinos horizontales de rodillos

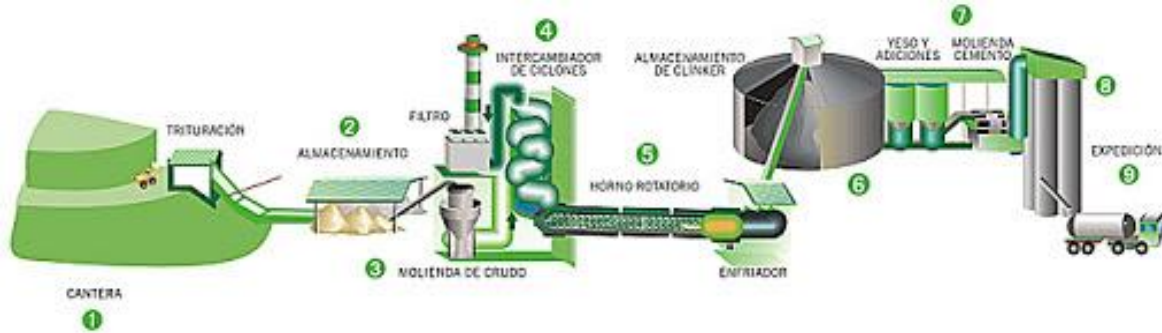
Una vez obtenido el cemento se almacena en silos para ser ensacado o cargado a granel.



**ILUSTRACIÓN 9. SILOS PARA ALMACENAR CEMENTO.**



**ILUSTRACIÓN 10. PLANTA DOSIFICADORA DE CEMENTO.**



**ILUSTRACIÓN 11. PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CEMENTO.**

## **2.2. Propiedades Químicas.**

### ***2.2.1. Composición Química Del Cemento Portland.***

Las materias primas utilizadas en la fabricación del cemento Portland consisten principalmente de cal, sílice, alúmina y óxido de hierro. Estos compuestos interactúan en el horno rotatorio de producción, para formar una serie de productos más complejos hasta formar una serie de productos más complejos, hasta alcanzar un estado de equilibrio químico, con la excepción de un pequeño residuo de cal no combinada, que no ha tenido suficiente tiempo para reaccionar.

Para efectos prácticos se entiende, como química del cemento, la química de los silicatos y aluminatos cálcicos anhidros e hidratados. En la química del cemento las fórmulas se expresan a menudo con la suma de óxidos; así, el silicato tricálcico ( $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$ ) puede escribirse en la forma  $3\text{CaOSiO}_2$ . Esta forma no implica, por supuesto, que los óxidos constituyentes tengan una existencia independiente dentro de la estructura del compuesto. En general, se emplean abreviaturas para las fórmulas químicas de los óxidos más frecuentes, como C para CaO y S para  $\text{SiO}_2$ . El silicato tricálcico  $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$  se transforma así en  $\text{C}_3\text{S}$ .

Este sistema se usa con frecuencia, justamente con la notación química ordinaria dentro de una simple ecuación química, p.e.  $3\text{CaO} + \text{SiO}_2 = \text{C}_3\text{S}$

Nombre del oxido	Formula	Abreviatura
Oxido de calcio	CaO	C
Dióxido de silicio	SiO <sub>2</sub>	S
Oxido de aluminio	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	A
Oxido férrico	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F
Agua	H <sub>2</sub> O	H
Oxido de magnesio	MgO	M
Trióxido de azufre	SO <sub>3</sub>	s
Oxido de potasio	K <sub>2</sub> O	K
Oxido de sodio	Na <sub>2</sub> O	N
Oxido de litio	Li <sub>2</sub> O	L
Oxido de fosforo	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	P
Óxido de hierro	FeO	f
Oxido de titanio	TiO <sub>2</sub>	T

**TABLA 2. ABREVIACIONES DE LOS ÓXIDOS.**

El clínker Portland es un mineral artificial formado por silicatos, aluminatos y ferro aluminatos de calcio, por lo cual, se suelen considerar cuatro componentes principales del cemento que se pueden observar en la siguiente tabla:

Nombre del compuesto	Formula	Abreviatura
Silicato tricálcico	$3\text{CaOSiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
Silicato di cálcico	$2\text{CaOSiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
Aluminio tricálcico	$3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
Ferro aluminato tetracíclico	$4\text{CaOFe}_2\text{O}_3\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$

**TABLA 3. COMPUESTOS DEL CEMENTO PORTLAND.**

Estos compuestos se forman en el interior del horno cuando la temperatura alcanza el punto en que la mezcla cruda se transforma en un líquido pastoso, que al enfriarse da origen a sustancias cristalinas de los primeros compuestos citados, rodeados por un material intersticial que contiene  $\text{C}_4\text{AF}$  y otros compuestos.

Estos compuestos, llamados potenciales, no se presentan aislados, sino que más bien puede hablarse de “fases” que los contienen en una gran proporción junto con algunas impurezas, por lo cual no son verdaderos compuestos en sentido químico, pero las proporciones calculadas de ellas revelan valiosa información en cuanto a las propiedades del cemento. De esta forma se habla de la fase Alita a base de  $C_3S$ ; de la fase Belita, a base de  $C_2S$ , de la fase aluminato, rica en  $C_3A$  y de la fase ferrito, solución sólida que consiste en ferritos y aluminatos de calcio.

La Alita (a base de  $C_3S$ ) es la fase principal en la mayoría de los clinkers Portland y de ella dependen en buena parte las características de desarrollo de resistencia mecánica; el  $C_3S$  endurece más rápidamente por tanto tiene mayor influencia en el tiempo del fraguado y en la resistencia inicial.

La Belita es usualmente la segunda fase en importancia en el clinker y su componente principal, el  $C_2S$ , se hidrata más lentamente y su contribución al desarrollo de la resistencia empieza a sentirse después de una semana.

### ***2.2.2. Hidratación Del Cemento.***

Es la reacción mediante el cual el cemento se transforma en un agente de enlace, generado por los procesos químicos responsables de la formación de compuestos durante la hidratación, lo cuales originan propiedades mecánicas útiles en las aplicaciones estructurales.

El estudio de las reacciones de hidratación del cemento suele hacerse sobre la pasta de cemento, la cual consiste en sólidos agua y poros. Los sólidos son en realidad un conjunto de partículas que difieren en cuanto a su composición química, morfológica y calidad cementante. Los poros difieren principalmente en tamaño y, por lo tanto, controlan el movimiento y comportamiento del agua necesaria para los procesos químicos de hidratación.

### ***2.2.3. Formación De La Pasta De Cemento.***

Esta se forma como consecuencia de las reacciones químicas del cemento con el agua. Dependiendo de la composición del cemento y de las condiciones de hidratación (temperatura, humedad, etc.), lo cual hace que la pasta sea un

sistema dinámico que cambia con el tiempo. Se forma un conjunto complejo de productos de hidratación.

Un gramo de cemento que tiene un diámetro medio cercano a 50 micras después de cierto tiempo de estar en contacto con el agua, empieza a dar señales de actividad química en su superficie, ya que aparecen cristales que van creciendo lentamente y se forma una sustancia gelatinosa que los envuelve (Gel); este gel que se forma inicialmente se llama gel inestable por poseer un porcentaje elevado de agua tanto que al cabo de poco tiempo la totalidad de agua disponible esta transformada en gel.

Los compuestos cristalinos necesitan agua para desarrollarse y por lo tanto la retiran del gel, el cual a medida que va perdiendo agua se transforma en gel estable que en gran medida es responsable de las propiedades mecánicas de las pastas endurecidas.



**2.2.4. Las Reacciones De Hidratación.**

Son principalmente las reacciones de hidratación del clinker sumándose a ellas las debidas a la presencia de sulfato de calcio (yeso) de las adiciones aditivas, si las hay y de los aditivos y compuestos menores pueden considerarse como principales reacciones de hidratación del clinker las correspondientes a la hidratación los silicatos y aluminatos de calcio. Durante la reacción con el agua los silicatos y aluminatos liberan hidróxido de calcio  $\text{Ca(OH)}_2$ .

Etapas de la reacción	Procesos químicos	Procesos físicos	Influencia en las propiedades mecánicas
Primeros minutos	Rápida dilución inicial de sulfatos y aluminatos de álcali, hidratación inicial de C3S; formación de etringita.	Alta velocidad de evolución de calor	Cambio en la composición de la fase líquida, puede influir en el fraguado.

<p>De 1-4 horas (periodo de inducción)</p>	<p>Disminución de silicato, pero aumento en la concertación de iones de Ca se inicia formación de núcleos de CH y C-S-H; la concentración de Ca alcanza un nivel de súper saturación</p>	<p>Formación de los primeros productos de hidratación; baja velocidad de evolución de calor.</p>	<p>Formación de cristales por balance inadecuado de los iones de aluminato y sulfato, pueden influir en el fraguado y la trabajabilidad. La hidratación de los silicatos de calcio determina el fraguado inicial.</p>
<p>Aprox. De la 3ra. a 12. hora (etapa de aceleración)</p>	<p>Rápida reacción química de los silicatos de Ca para forman C-S-H y CH;</p>	<p>La rápida formación de hidratos provoca una disminución en la porosidad,</p>	<p>Fraguado inicial, cambio de consistencia plástica a rígida, desarrollo de</p>

	disminución de la súper saturación de Ca.	alta velocidad de evolución de calor.	resistencia temprana, fraguado final.
Etapa de postaceleración	Formación de CH y C-S-H controlada por difusión, recristalización de etringita a monosulfato y polimerización de posibles silicatos.	Disminución en la evolución de calor, continúa disminución de la porosidad formación de adherencia entre partículas, pasta y agregados.	Continúo desarrollo de la resistencia a velocidad decreciente. La porosidad y morfología del sistema hidratado determina la resistencia final, estabilidad del volumen y durabilidad.

**TABLA 4. REACCIONES DE HIDRATACIÓN.**

### ***2.2.5. Calor De Hidratación.***

El proceso de hidratación es un proceso exotérmico lo cual hace que los concretos al fraguar y endurecer aumenten de temperatura; este incremento es importante en concretos masivos, debido a que cuando ha ocurrido el fraguado y se inicia el descenso térmico, se origina contracción del material, que puede conducir a graves agrietamientos.

Es el generado cuando reacciona el cemento y el agua. Dicha cantidad de calor depende de la composición química del cemento; a la tasa de generación de calor la afecta la finura y temperatura de curado, así como la composición química. La alta temperatura en estructuras de gran masa puede resultar inconveniente ya que podría estar acompañada de dilatación térmica por otra parte es benéfica en tiempo frio, ya que ayuda a mantener temperaturas de curado favorable.

El calor de hidratación es la cantidad de calor en calorías por gramo de cemento deshidratación, después de una hidratación completa a una temperatura dada. El calor de hidratación del cemento es aproximadamente igual a la suma

de los calores de hidratación de los compuestos individuales, hidratados por separado.

Compuesto	Calor liberado en cal/g			
	7 días	28 días	6 meses	Hidratado completamente
C <sub>3</sub> S	110	120	120	120
C <sub>2</sub> S	20	45	60	62
C <sub>3</sub> A	185	205	207	207
C <sub>4</sub> AF	40	50	70	100

**TABLA 5. CALOR DE HIDRATACIÓN.**

En un cemento Pórtland normal el calor de hidratación es de 80-100 calorías por gramo el aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A) desarrolla el más alto calor de hidratación por lo cual se debe controlar su contenido en un cemento.

Una formula aproximada para calcular el calor de hidratación es:

Calor de hidratación de un gramo de cemento =  $136 (\%C_3S) + 62 (\%C_2S) + 200 (\%C_3A) + 30 (\%C_4AF)$

### ***2.2.6. Resistencia A Los Sulfatos.***

Debido a que los sulfatos atacan el concreto endurecido porque reaccionan con el aluminato tricálcico, para formar el sulfoaluminato de calcio el cual tiene un volumen mayor que el de los dos componentes que lo originan, es conveniente desde un punto de vista controlar el contenido de  $C_3A$ , la consecuencia de este aumento de volumen son la aparición de esfuerzos internos que pueden desintegrar el concreto.

### ***2.2.7. Propiedades Físicas Y Mecánicas Del Cemento.***

Estas permiten complementar las propiedades químicas y conocer algunos aspectos de su bondad. Estas dependen del estado en que se encuentre y son medidas a través de ensayos sobre el cemento, la pasta del cemento y sobre el mortero los cuales determinan las características físicas y mecánicas del cemento antes de ser utilizado.

**a. Finura o superficie específica.**

Como sabemos una de las etapas del proceso de fabricación del cemento es la molienda del clinker con el yeso. La finura es una de las propiedades más importante ya que está ligada a su valor hidráulico. Ya que la hidratación de los granos de cemento ocurre desde la superficie al interior, el área total superficial de las partículas del cemento constituye el material de hidratación. Al aumentar finura aumenta la rapidez a la que se hidrata el cemento dando una mayor retracción y, por tanto, es más susceptible a la fisuración. Es decir, que una molienda muy fina dará lugar a cementos que endurecen rápidamente y, por tanto, también tienen un desarrollo más rápido de su resistencia, cuanto más fino sea un cemento este se deteriorara más rápido por la exposición a la atmósfera.

Por otro lado, los cementos con granos gruesos se hidratan y endurecen lentamente y pueden producir exudación de agua por su escasa rapidez para retenerla. Se estima que la velocidad de hidratación es de 3.5 micras en 28 días, lo cual indica que las partículas pueden pasar varios años en hidratarse inclusive no hacerlo lo cual daría un rendimiento muy pequeño del mismo.

**b. Firmeza.**

Cualidad en que una pasta de cemento endurecida conserva su volumen después de fraguar. La ausencia de esta propiedad es producida por cantidades excesivas de cal libre muy quemada.

**c. Tiempo de fraguado.**

Este término se usa para describir el cambio del estado plástico al estado endurecido de una pasta de cemento. En la práctica, cuando una cantidad de cemento se mezcla con agua se forma una pasta plástica, que se pierde a medida que pasa el tiempo, hasta que llega un momento en que la pasta pierde su viscosidad y se eleva su temperatura, el tiempo transcurrido desde la adición del agua se llama fraguado inicial del cemento e indica que el cemento está hidratado y está semiduro.

Posteriormente, la pasta sigue fraguando hasta que deja de ser deformable con carga relativamente pequeñas. Se vuelve rígida y llega al máximo de temperatura este es el tiempo de fraguado final e indica que el cemento se encuentra aún más hidratado y la pasta ya está dura. A partir de este momento,



la pasta empieza el proceso de endurecimiento y la estructura del cemento fraguado va adquiriendo resistencia mecánica.

Fraguado es el tiempo que una mezcla de cemento permanece en estado plástica, el tiempo suficiente para permitir un colado sin difíciles operaciones determinadas. El periodo en el cual la mezcla permanece plástica depende más de la temperatura y del contenido de agua que del tiempo de fraguado. La prueba de fraguado se hace con la aguja de Vicat de peso 1 Kg. Los *factores* que tienen mayor influencia en los tiempos de fraguado son los siguientes:

- La composición química del cemento.
- La finura del cemento, ya que mientras más finos los granos mayor velocidad de hidratación.
- Mientras mayor sea la cantidad de agua de amasado más rápido es el fraguado.
- A menos temperatura ambiente más lentamente ocurren las reacciones de hidratación a temperaturas por debajo de  $-1^{\circ}\text{C}$  el cemento no fragua.

- A mayor temperatura ambiente más rápido ocurren las reacciones de hidratación, pero los 32°C se puede observar un efecto inverso.

**d. Falso fraguado.**

Rigidez prematura y anormal del cemento, que se presente dentro de los primeros minutos después de haberlo mezclado con agua. Difiere del anterior en que no despiden calor en forma apreciable y, si se vuelve a mezclar la mezcla de cemento sin adición de agua se reestablece su plasticidad y fraguado normal sin pérdida de resistencia y se debe a que en algunas ocasiones cuando las temperaturas en fábricas de molino son superiores a 100 °C se puede presentar deshidratación parcial o total del regulador (Retardador) del fraguado del cemento que es el yeso.

**e. Resistencia a compresión.**

Es la propiedad que resulta más obvia en cuanto a los requisitos para usos estructurales. Es importante tener en cuenta las causas que puedan provocar pérdidas de resistencia de este material: envejecimiento, humedecimiento e

incorrecto almacenamiento. La resistencia a la tracción y compresión del cemento puzolánico es un poco menos que la del cemento corriente durante el primer año, pero no hay ningún aumento más después de dicho periodo en el cemento corriente. Gracias a la reacción físico-química de absorción de la cal por la puzolana aumenta la resistencia mecánica a largo plazo superando el valor de resistencia del corriente con una actividad que se desarrolla durante muchos años.

La resistencia de los cementos se desarrolla en períodos de tiempo relativamente largos. El crecimiento es rápido en los primeros días y después de cuatro semanas es poco importante en los cementos portland, no así en los cementos con adiciones, en los cuales, dependiendo del tipo de adición y de su contenido, el aumento de resistencia más allá de los 28 días puede llegar a ser fundamental para determinado tipo de obras.

Los porcentajes de resistencia comparados con la resistencia de 28 días están entre 30 y 50 % a 3 días y entre 50 y 80 % a los 7 días.

El aumento de resistencia es bajo después de los 28 días, en aquellos cementos que tienen porcentajes mayores de resistencia a 3 y 7 días. Por el contrario, aquellos que tienen bajos porcentajes, aumentan su resistencia en forma muy significativa en el largo plazo.

Existen casos de cemento puzolánico que de 20-30 años de edad todavía la sílice de la puzolánica continúa reaccionando con el hidrato de calcio del cemento con consiguiente aumento lento y continuo de la resistencia mecánica y química.

#### **f. Perdida por ignición.**

Una elevada perdida por ignición es una indicación de prehidratación o carbonatación que puede ser producida por un almacenamiento incorrecto y prolongado. Normalmente la pérdida de peso no excede del 2%.

**g. Peso específico.**

Es la relación que existe entre la masa de una cantidad dada y el volumen absoluto de éste su valor varía poco y en un cemento Portland normal cuando no hay adiciones distintas al yeso, suele estar comprendido entre 3.1-3.15 g/Cm<sup>3</sup>. en caso de los cementos con adiciones es menor ya que el contenido de clinker por tonelada es menor y su valor puede estar en el rango de 3-3.1 g/Cm<sup>3</sup> dependiendo del porcentaje de adiciones del cemento. Cuando es en escoria de altos hornos puede tener 2.9g/Cm<sup>3</sup>. El peso específico de un cemento no indica la calidad de este; su uso principal es para el proyecto de mezcla.

**h. Consistencia normal.**

La cantidad de agua que se le agrega el cemento la comunica una determinada fluidez, la cual aumenta al incrementar el contenido de agua. Existe una determinada fluidez a la que se agrega cierta cantidad de agua, esta fluidez es la que se llama consistencia normal. Es una característica complementaria de otros ensayos que tienen relación directa con la calidad del cemento como el tiempo de fraguado. Se mide por medio del aparato de vicat.



Los cementos pueden diferir entre sí, en cuanto al requerimiento de agua y la diferencia, es aún mayor en cementos con adiciones los que requieren más agua que los normales por su mayor superficie específica. El contenido normal de una pasta se expresa en porcentaje de peso en seco y suele variar entre 23-33% dependiendo de las características del cemento.

### **2.3. Influencia De Sus Principales Compuestos De Cemento.**

#### ***2.3.1. Cementos Mezclas: Influencia Del Tamaño De Las Partículas De Escoria.***

##### **a. Cemento**

Para la realización de los ensayos se utilizó un cemento portland (CPN) sin adiciones, con una composición mineralógica de 62 % de  $C_3S$ , 14 % de  $C_2S$ ,

0 % de  $C_3A$  y 16 % de  $C_4AF$ , categoría resistente 50 (medida sobre pobretas ISO-RILEM) y una finura Blaine de 360  $m^2/kg$ . En la Tabla 6 se muestra la composición química, mientras que las propiedades físicas se informan en la Tabla 7.

Valores, %	Cemento Portland, <i>CPN</i>	Escoria granulada de alto horno, <i>E</i>
SiO <sub>2</sub>	20.98	34.07
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.46	11.95
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.23	1.04
CaO	63.52	38.58
MgO	0.86	9.54
SO <sub>3</sub>	2.35	0.84
K <sub>2</sub> O	0.95	0.41
Na <sub>2</sub> O	0.09	0.15
Pérdida por calcinación	2.12	1.30

**TABLA 6. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS MATERIALES.**

Propiedad	Cemento Portland, <i>CPN</i>	Escoria, <i>E</i>			
Densidad	3.10	2.95			
Finura Blaine, $m^2/kg$	360	460	680	900	
Contenido de partículas, %	< 10 $\mu m$	48	38	57	75
	Entre 10 y 45 $\mu m$	46	54	39	24
	> 45 $\mu m$	7	8	4	1
Parámetro de posición, $x'$ ( $\mu m$ ) <sup>a</sup>	14.50	19.87	13.51	7.15	
Parámetro de homogeneidad, $n^b$	1.20	1.04	0.90	0.78	

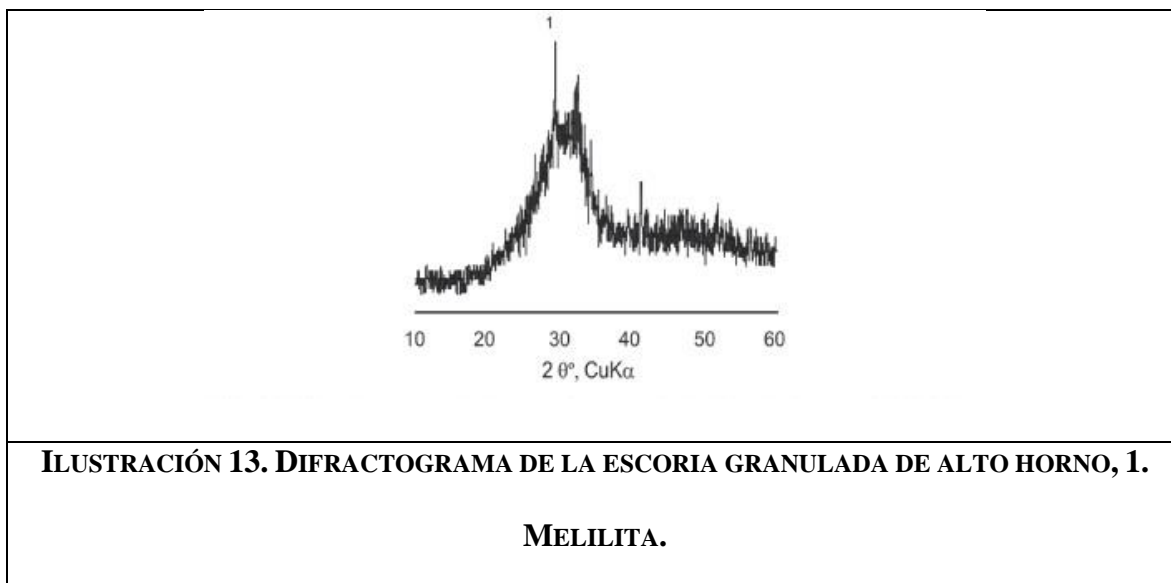
<sup>a</sup> Diámetro característico de la distribución de tamaños de partículas, obtenido a una masa acumulada de 63.2 %.

<sup>b</sup> Pendiente de la curva de distribución del tamaño de las partículas que representa el ancho de la misma.

**TABLA 7. PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MATERIALES.**

**b. Adición mineral.**

La escoria granulada de alto horno (*E*) con una finura Blaine de 460 m<sup>2</sup>/kg y un módulo químico (*C+M+A/S*) de 1.76 (IRAM 1667/90) fue clasificada como una escoria básica. El índice de actividad con cemento determinado a 7 y 28 días, según la norma ASTM 989/05, corresponde a una escoria de grado 100 y su análisis por difracción por Rayos X (DRX) mostró sólo una pequeña proporción de materiales cristalinos (melilita) en  $2\Theta = 30.0^\circ$  (*d*: 3.00), evidenciando el rápido enfriamiento al que fue sometida (Ilustración 13). En la Tabla 6 se muestra la composición química.





A esta escoria se le realizó una molienda adicional en el laboratorio para lograr las finuras de 680 y 900 m<sup>2</sup>/kg. El procedimiento se realizó con un molino a bolas de laboratorio (ML-300 TECMAQ) de cámara plana (sin revestimiento) de diámetro | de 285 mm y largo 330 mm, con un volumen de 20900 cm<sup>3</sup>. Los cuerpos moledores utilizados fueron bolas forjadas de acero al cromo-molibdeno de diámetro 15 mm ocupando un 46 % del volumen del molino. Esta molienda adicional se realizó durante ocho horas en forma continua, sobre muestras de 1.5 kg de escoria granulada utilizando como agente dispersante trietanolamina al 0.03 % (Wan *et al.*, 2004). Las propiedades físicas de la escoria con diferentes finuras se informan en la Tabla 7.

### **c. Cementos mezclas estudiados.**

Los cementos con adiciones se obtuvieron por reemplazos variables de cemento *CPN* por escoria. Los contenidos estudiados fueron 20, 40, 60 y 80 %, definiendo así cementos mezclas con un rango de medio a alto contenido de adiciones. Las pastas de cemento mezclan, se identifican con el término *CPN* más (+) el contenido de escoria incorporado. Adicionalmente se estudió la pasta elaborada con *CPN*.

**d. Proporciones, moldeo y curado de las pastas.**

Con los cementos mezclas antes descritos se elaboraron pastas con una relación  $a/mc$  de 0.40. Las pastas fueron colocadas en moldes prismáticos de sección cuadrada de 625 mm<sup>2</sup> y 300 mm de largo y compactadas en dos capas de 25 golpes cada una. Inmediatamente luego de ser terminadas, los moldes fueron cubiertos con un film plástico y se colocaron a 20 °C con una variación  $\pm 1$  °C.

Después de 24 horas las probetas se retiraron de los moldes, se colocaron en recipientes herméticos y se curaron, con agua saturada con cal en el caso de las pastas con *CPN* y sólo con agua en el caso de las pastas con escoria. El volumen de agua de curado se mantuvo comprendido entre 3.5 y 4.0 veces el volumen de las probetas. Las edades de ensayo fueron 2, 7, 28 y 90 días.

**e. Resistencia mecánica.**

La resistencia a compresión se evaluó sobre las probetas prismáticas, de sección transversal de 625 mm<sup>2</sup>. Los resultados informados en la Tabla 8 corresponden al promedio de seis determinaciones por edad.

Resistencia a compresión, MPa												
Tipo de cemento	Finura Blaine 460 m <sup>2</sup> /kg				Finura Blaine 680 m <sup>2</sup> /kg				Finura Blaine 900 m <sup>2</sup> /kg			
	2d	7d	28d	90d	2d	7d	28d	90d	2d	7d	28d	90d
<b>CPN+20E</b>	39.5	54.5	73.1	81.3	42.2	63.8	77.3	81.6	46.3	66.3	79.9	83.5
<b>CPN+40E</b>	28.9	41.2	65.2	81.6	39.5	53.8	72.9	79.6	42.0	60.8	75.8	82.3
<b>CPN+60E</b>	18.4	28.4	56.5	67.2	29.2	49.0	69.4	75.6	39.9	57.5	74.4	81.0
<b>CPN+80E</b>	9.2	19.3	50.8	55.6	24.1	47.3	64.9	70.3	33.7	52.2	69.2	75.8

**TABLA 8. RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE LAS PASTAS.**

La resistencia a flexión se determinó sobre probetas prismáticas de con una sección de 625 mm<sup>2</sup> y 85 mm de largo. El sistema de carga empleado fue simplemente apoyada cargada al centro de la luz, con una luz entre apoyos de 65 mm. Los resultados informados en la Tabla 9 corresponden al promedio de tres determinaciones por edad.

Resistencia a flexión, MPa												
Tipo de cemento	Finura Blaine 460 m <sup>2</sup> /kg				Finura Blaine 680 m <sup>2</sup> /kg				Finura Blaine 900 m <sup>2</sup> /kg			
	2d	7d	28d	90d	2d	7d	28d	90d	2d	7d	28d	90d
<b>CPN+20E</b>	7.6	10.3	11.9	12.6	8.2	11.0	12.7	13.2	9.8	12.9	13.2	13.9
<b>CPN+40E</b>	5.8	8.6	10.6	12.2	6.8	9.9	11.0	13.9	8.2	10.9	13.4	14.5
<b>CPN+60E</b>	3.8	5.5	9.0	10.8	5.2	8.5	10.8	12.3	6.9	9.2	11.9	13.0
<b>CPN+80E</b>	3.5	5.4	8.9	10.5	4.3	6.9	9.2	11.3	6.2	8.3	10.0	12.1

**TABLA 9. RESISTENCIA A FLEXIÓN DE LAS PASTAS.**

**f. Agua no evaporable.**

Para estimar el progreso de la hidratación se analizó el contenido de agua no evaporable (*W<sub>n</sub>*) de acuerdo con el procedimiento propuesto por Powers (1949). Este parámetro se determinó como la diferencia entre el peso de la muestra seca

a 105 °C ( $P_{105}$ ), el peso a 950 °C ( $P_{950}$ ) y el peso de las pérdidas por calcinación del cemento ( $P_{xCPN}$ ) y la escoria ( $P_{xE}$ ) en los porcentajes correspondientes, todos ellos referidos a la cantidad de material cementante ( $mc$ ) presente en la muestra. En este último término se asumió que la totalidad de la escoria reacciona para producir silicato de calcio hidratado (CSH):

$$W_n = \frac{P_{105} - P_{950} - (P_{xCPN} + P_{xE})}{mc} \quad (1)$$

**g. Determinación del tiempo necesario para alcanzar el 50 % de la reacción.**

Este parámetro se determinó empleando la ecuación sugerida por Knudsen (1980), donde la resistencia y la edad de los cementos curados a una determinada temperatura, pueden relacionarse por medio de la ecuación hiperbólica 2:

$$S = \frac{S_u K_r (t - t_0)}{I + K_r (t - t_0)} \quad (2)$$

$S$  es la resistencia al tiempo  $t$ ,  $S_u$  es la resistencia última,  $K_t$  es la constante de la reacción ( $K=1/t_{50}$ ),  $t_{50}$  es el tiempo necesario para alcanzar el 50 % de la reacción y  $t_0$  es el tiempo inicial de desarrollo de resistencia.

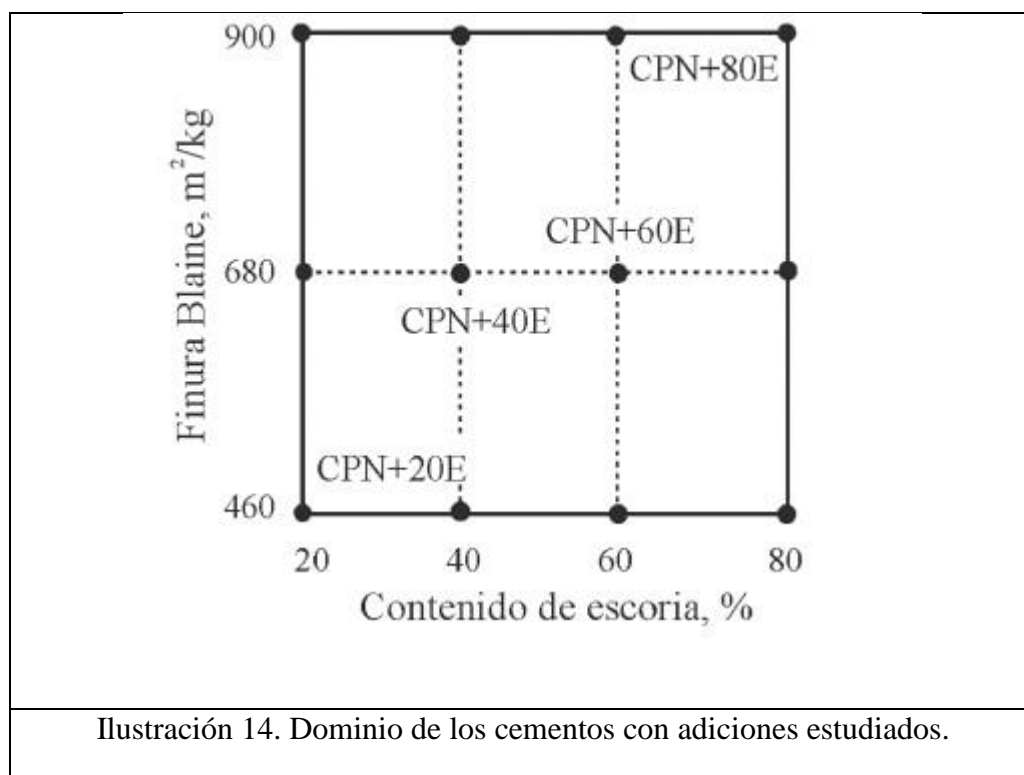
Los parámetros  $S_u$  y  $K_t$  fueron obtenidos por análisis de regresión utilizando el software DATAFIT, empleando como valor de  $t_0$  el tiempo final de fraguado de cada pasta. El desarrollo de la hidratación de las muestras se evaluó a partir de la determinación de  $t_{50}$  que es el recíproco de la constante  $K_t$ .

#### **h. Diseño de experimentos.**

Con el fin de evaluar el contenido de escoria y su finura como un sistema de variables interrelacionadas se adoptó un diseño de experimentos, donde las dos variables experimentales son el contenido de escoria ( $X_1$ ) y la finura de la escoria ( $X_2$ ).

El empleo de un diseño de experimentos permite predecir la respuesta de otros puntos experimentales, que, si bien pertenecen al dominio estudiado, no forman parte de las pastas que necesariamente deben realizarse para obtener la

modelación. La Ilustración 14 muestra el dominio definido por los puntos experimentales (•) que conforman el diseño adoptado para cada cemento estudiado.



La utilización de finuras tan elevadas como 900 m<sup>2</sup>/kg quedó definida por el propio dominio del sistema de experimentos seleccionado, sin desconocer que alcanzar estas finuras en la práctica ocasiona serios inconvenientes de índole tecnológica, económica y ambiental.

A partir de este sistema (Montgomery y Runger, 1996), la resistencia a compresión y a flexión se determinó por el análisis de las superficies de respuesta. La ecuación del modelo está dada por la ecuación 3:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_1^2 + \beta_4 X_2^2 + \beta_5 X_1 X_2 \quad (3)$$

donde, Y: es la resistencia a compresión o a flexión a una edad determinada,  $X_1$  y  $X_2$ : son las variables experimentales y  $\beta_0, \dots, \beta_5$ : son los coeficientes estimados a partir del método de mínimos cuadrados que se informan en la Tabla 10.

Edad, días	Coeficientes resistencia a compresión						$R^2$	Prob > F
	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\beta_5$		
<b>2</b>	27.3	-0.64	0.06	-1.24*	-0.04*	0.60*	0.98	0.0001
<b>7</b>	8.97	-1.20	0.19	3.66*	0.13*	0.06*	0.98	0.0001
<b>28</b>	51.9	-0.30	0.07	-1.71*	-0.04*	0.22*	0.98	0.0001
<b>90</b>	86.0	-0.37	4.30*	-4.01*	-0.02*	0.76*	0.94	0.0010

Edad, días	Coeficientes resistencia a flexión						$R^2$	Prob > F
	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\beta_5$		
<b>2</b>	10.9	-0.144	-5.40*	0.61*	0.007*	-0.0003*	0.99	0.0001
<b>7</b>	8.3	-1.135	0.01	-0.44*	0.004*	0.019*	0.97	0.0003
<b>28</b>	12.1	-0.039	-0.75*	-0.15*	0.0397*	-0.0006*	0.93	0.0024
<b>90</b>	8.6	0.023	9.76*	-0.67*	-0.044*	0.114*	0.91	0.0041

(\*) el número informado  $\cdot 10^{-2}$

**TABLA 10. COEFICIENTES ESTIMADOS A PARTIR DEL MÉTODO DE MÍNIMOS CUADRADOS,**

**$R_2$  Y PROB > F.**

Todos los valores de  $Prob > F$  (Test de Fisher) para las distintas edades estudiadas, fueron menores que 0.05 indicando que el modelo fue significativo y el coeficiente  $R^2$  (Tabla 10) fue mayor a 0.91 mostrando una buena correlación entre los valores experimentales y calculados.

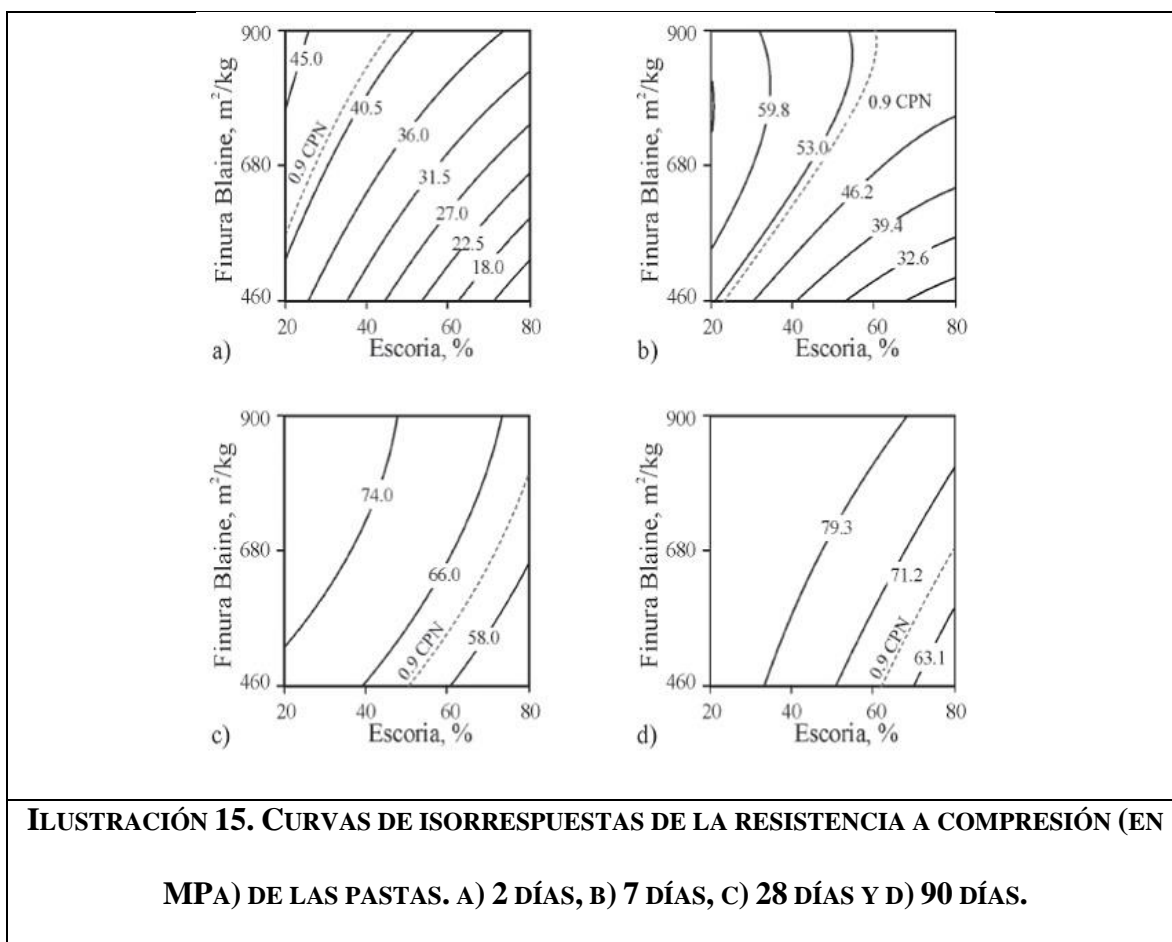
La máxima diferencia entre la resistencia a compresión experimental y calculada fue de  $\pm 9.0 \%$ , mientras que esta diferencia para la resistencia a flexión fue de  $\pm 4.8 \%$ .

### ***2.3.2. Presentación De Los Resultados.***

#### **a. Resistencia a compresión.**

La Ilustración 15 muestra las curvas de isorrespuestas de la resistencia a compresión de las pastas > estudiadas hasta la edad de 90 días. En todos los casos, se ha determinado el entorno de cada superficie de respuesta considerando que el mismo sea en el orden del 10 % de la máxima resistencia obtenida en el dominio estudiado a cada edad.





Los valores obtenidos por la pasta *CPN* a 2, 7, 28 y 90 días fueron 46.1, 57.0, 69.0 y 75.2 MPa, respectivamente.

Con el objetivo de comparar el comportamiento de las pastas con distintos contenidos de escoria y finura con el obtenido por la pasta *CPN*, en cada una de las edades se ha superpuesto la curva de isorrespuesta correspondiente al 90 % de la resistencia alcanzada por la pasta *CPN*.

A 2 días (Ilustración 15a) se puede observar que, para una determinada finura, a medida que el contenido de escoria aumenta, se produce una disminución de la resistencia. Sin embargo; cuando la finura de la escoria se incrementa, las curvas de isorrespuestas tienden a estar más separadas entre sí, generándose menores disminuciones de la resistencia con el incremento de la variable  $X_1$ . Esto es, para la finura de  $460 \text{ m}^2/\text{kg}$  el incremento en el contenido de escoria de 20 (39.5 MPa) a 80 % (9.2 MPa) produce una disminución de la resistencia en el orden del 77 %; mientras que para la finura de  $900 \text{ m}^2/\text{kg}$  sólo resultan ser de 27 %. Además, con valores de  $X_2 > 500 \text{ m}^2/\text{kg}$  es posible alcanzar una resistencia similar a la registrada por la pasta *CPN* con valores de  $20\% < X_1 < 45\%$ .

A 7 días (Ilustración 15b), las pastas elaboradas con escorias con una finura de  $460 \text{ m}^2/\text{kg}$  presentan un comportamiento similar al registrado a 2 días, pues cuando la variable  $X_1$  se incrementa de 20 (54.5 MPa) a 80 % (19.3 MPa) se registran disminuciones de la resistencia del orden del 65 %. No obstante, para valores de  $X_1 < 50\%$  y  $X_2 > 680 \text{ m}^2/\text{kg}$ , las curvas de isorrespuestas resultan independiente de la variable  $X_2$ , mientras que para valores de  $X_1 > 60\%$  prácticamente toda la zona del dominio alcanza un nivel de resistencia similar

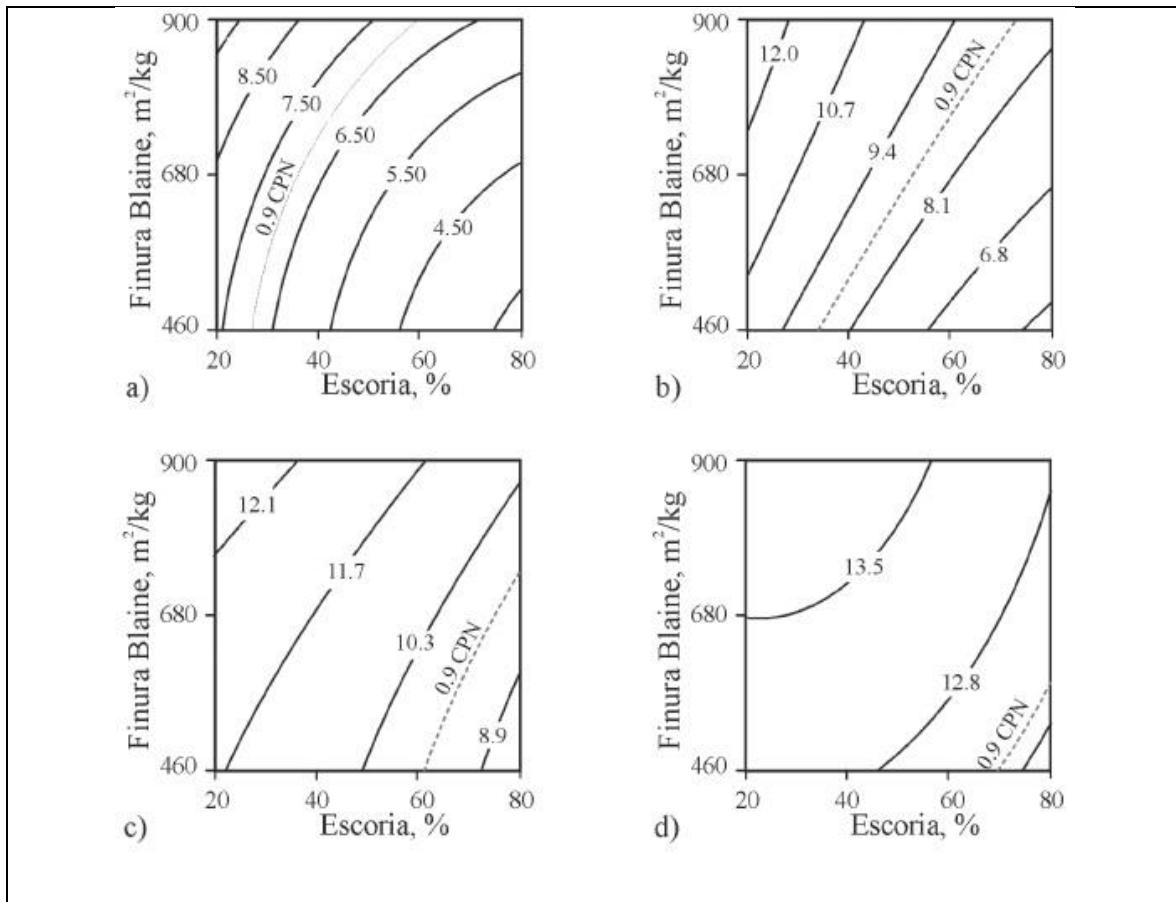
(zona delimitada por las curvas 46.2-53.0 MPa). Aun así, la  $\rho$  zona de máxima resistencia ( $>59.8$  MPa) queda definida por valores de  $20 \% < X_1 < 30 \%$  y  $500 \text{ m}^2/\text{kg} < X_2 < 900 \text{ m}^2/\text{kg}$ .

Por último, para alcanzar una resistencia similar a la registrada por la pasta CPN existe una mayor combinación de variables que a la edad de 2 días, pues puede lograrse con valores de  $X_1=22 \%$  y  $X_2=460 \text{ m}^2/\text{kg}$  hasta  $X_1=55 \%$  y  $X_2=900 \text{ m}^2/\text{kg}$ .

A 28 y 90 días (Ilustración 15c y d), las curvas de isorrespuestas se encuentran más separadas entre sí indicando una menor dependencia entre el contenido de escoria y la finura para alcanzar un determinado nivel resistente, aun así las zonas de máximas resistencias se encuentran definidas de acuerdo a los valores que adoptan las variables, esto es: bajos valores  $X_2$  requieren bajos valores de  $X_1$  y altos valores de  $X_2$  permiten altos valores de  $X_1$ . Finalmente, a 90 días la mayor parte del dominio estudiado registra una resistencia similar o superior a la registrada por la pasta CPN.

**b. Resistencia a flexión.**

La Ilustración 16 muestra las curvas de isorrespuestas de la resistencia a flexión de las pastas estudiadas. Los valores obtenidos por la pasta CPN a 2, 7, 28 y 90 días fueron 8.2, 9.7, 10.9 y 12.0 MPa, respectivamente. Con el objetivo de comparar el comportamiento de las pastas con distintos contenidos de escoria y finura con el obtenido por la pasta CPN, en cada una de las edades se ha superpuesto la curva de isorrespuesta correspondiente al 90 % de la resistencia alcanzada por la pasta CPN.



**ILUSTRACIÓN 16. CURVAS DE ISORRESPUESTAS DE LA RESISTENCIA A FLEXIÓN (EN MPA) DE LAS PASTAS. A) 2 DÍAS, B) 7 DÍAS, C) 28 DÍAS Y D) 90 DÍAS.**

A 2 días (Ilustración 16a), el comportamiento de las pastas frente a la resistencia a flexión es similar al registrado frente a la resistencia a compresión, pues para una finura dada el aumento en el contenido de escoria produce una disminución de la resistencia a flexión. Aun así, una resistencia similar a la registrada por la pasta *CPN* puede alcanzarse con valores de  $X_1 < 27\%$  y  $X_2 = 460$  m<sup>2</sup>/kg o  $X_1 < 60\%$  y  $X_2 = 900$  m<sup>2</sup>/kg.

A 7 días (Ilustración 16b), para las finuras de 460 y 680 m<sup>2</sup>/kg las disminuciones de resistencias que se producen cuando el valor de  $X_1$  aumenta de 20 a 80 % son de aproximadamente 47 %, mientras que para  $X_2 = 900$  m<sup>2</sup>/kg la disminución de este parámetro resulta de 37 %. Además, a esta edad existe una mayor combinación de variables que permiten alcanzar una resistencia similar a la obtenida por la pasta *CPN* ( $X_1 < 35\%$  y  $X_2 = 460$  m<sup>2</sup>/kg o  $X_1 < 75\%$  y  $X_2 = 900$  m<sup>2</sup>/kg).

A 28 días (Ilustración 16c), las curvas de isorrespuestas se encuentran más separadas entre sí indicando una menor dependencia entre las variables; por ejemplo, la pasta *CPN+40E* registra una resistencia similar (zona delimitada por las curvas 10.3-11.7 MPa) cuando la variable  $X_2$  adopta valores comprendidos entre 460 y 680 m<sup>2</sup>/kg o la pasta *CPN+80E* alcanza una resistencia entre 8.9-10.3 MPa para valores de 600 m<sup>2</sup>/kg <  $X_2$  < 850 m<sup>2</sup>/kg.

A 90 días (Ilustración 16d) se observa un comportamiento similar al registrado a los 28 días, registrándose las mayores resistencias para valores de 20 % <  $X_1$  < 57 % y 680 m<sup>2</sup>/kg <  $X_2$  < 900 m<sup>2</sup>/kg. Aun así, prácticamente todo el dominio estudiado registra una resistencia similar o mayor a la alcanzada por la pasta CPN.

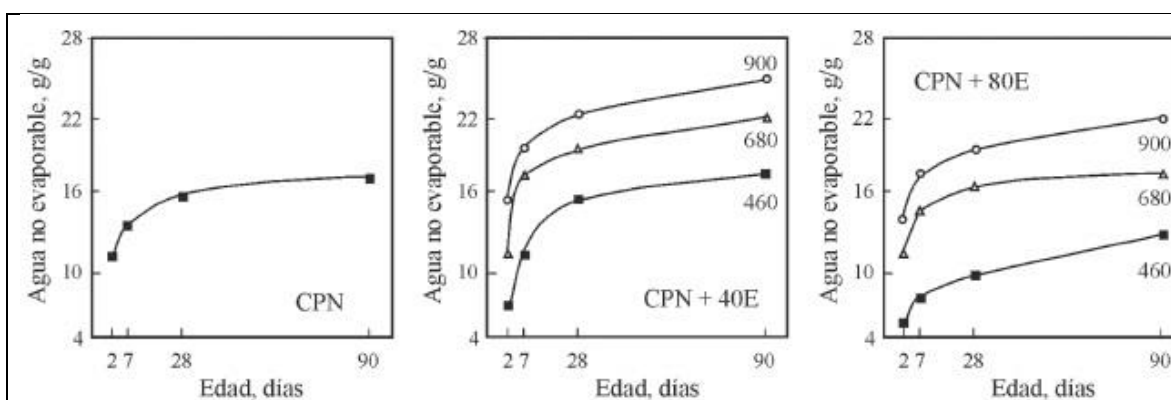
Por último, la Tabla 11 muestra el contenido de escoria que se puede incorporar para obtener una resistencia igual o mayor al 90 % de la resistencia alcanzada por la pasta CPN. Para cumplir este requisito se puede observar que la cantidad de escoria aumenta con la edad y con la finura de la adición, y depende de la resistencia que se evalúa, pudiéndose incorporar mayor cantidad cuando se evalúa la resistencia a flexión que a compresión.

Contenido de escoria,	Resistencia a compresión			Resistencia a flexión		
	460 m <sup>2</sup> /kg	680 m <sup>2</sup> /kg	900 m <sup>2</sup> /kg	460 m <sup>2</sup> /kg	680 m <sup>2</sup> /kg	900 m <sup>2</sup> /kg
2 días	<20	26	45	26	35	59
7 días	22	48	60	35	53	73
28 días	50	72	80	61	76	80
90 días	62	80	80	70	80	80

**TABLA 11. MÁXIMO CONTENIDO DE ESCORIA PARA ALCANZAR UNA RESISTENCIA SIMILAR O MAYOR A LA REGISTRADA POR LA PASTA CPN.**

**c. Agua no evaporable.**

En la Ilustración 17, puede observarse que los contenidos de agua no evaporable para todas las pastas *CPN+40E* se incrementan con el aumento de la finura, mostrando un comportamiento similar al registrado en la resistencia (Tablas 8 y 9). Esta tendencia se verifica para las pastas *CPN+80E* para todas las edades estudiadas.



**ILUSTRACIÓN 17. AGUA NO EVAPORABLE DE LAS PASTAS CON DISTINTAS FINURAS**

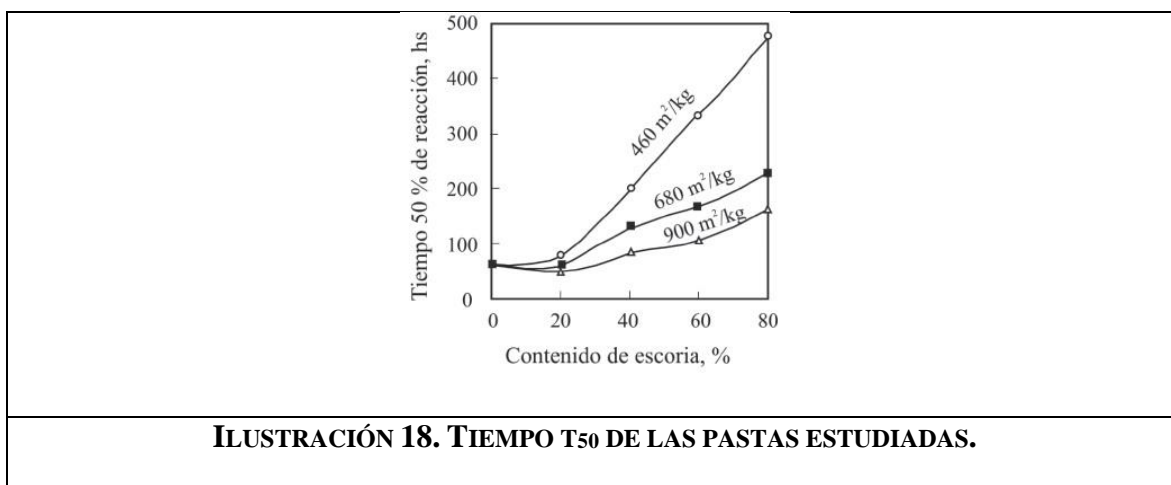
**BLAINE. A) CPN, B) CPN + 40E Y C) CPN + 80E.**

A 2 días, las pastas con escoria finura Blaine 460 m<sup>2</sup>/kg presentan una disminución del contenido de agua no evaporable con respecto a la pasta CPN, siendo para las pastas *CPN+40E* y *CPN+80E* del 38 y 53 %, respectivamente. Este comportamiento es atribuido a que el efecto de dilución de los granos de cemento es preponderante dado que la escoria no ha reaccionado. A esta edad, las pastas con escoria finura Blaine 680 y 900 m<sup>2</sup>/kg registran incrementos de agua no evaporable con respecto a la pasta *CPN* del 7.2 y 33 %; y 7.8 y 29.8 % para las pastas *CPN+40E* y *CPN+80E*, respectivamente. Un comportamiento similar es registrado en las restantes edades por todas las pastas estudiadas.

#### **d. Evaluación de los tiempos de reacción de las pastas.**

La Ilustración 17 muestra el efecto de la finura Blaine de la escoria sobre el tiempo necesario para lograr el 50 % de la reacción ( $t_{50}$ ) de las pastas de cementos con contenido variable de escoria.





**ILUSTRACIÓN 18. TIEMPO  $T_{50}$  DE LAS PASTAS ESTUDIADAS.**

En la misma se puede observar que, para una finura dada a medida que aumenta el contenido de escoria en la pasta se produce un incremento en el tiempo necesario para alcanzar el 50 % de la reacción, y este efecto es más importante a medida que disminuye la finura de la escoria. Así, para la finura de 460 m<sup>2</sup>/kg la pasta *CPN+80E* (482.4 horas) tiene un  $t_{50}$  7.7 veces mayor que el registrado por la pasta *CPN* (62.8 horas), mientras que para la finura de 900 m<sup>2</sup>/kg este valor resulta 2.6 veces mayor. Por otra parte, para las finuras mayores a 680 m<sup>2</sup>/kg, las pastas *CPN+20E* alcanzan el 50 % de la reacción a menores tiempos que la pasta *CPN*.

Por último, para un determinado contenido de escoria el valor  $t_{50}$  crece considerablemente entre los obtenidos por las pastas con finura 460 m<sup>2</sup>/kg

respecto a los registrados por las pastas con finura 900 ó 680 m<sup>2</sup>/kg. Por ejemplo, para la pasta *CPN+40E* los valores  $t_{50}$  resultan 203.4, 129.7 y 85.7 horas, respectivamente.

El análisis de la influencia de la distribución de partículas de la escoria sobre el comportamiento de pastas de cemento con contenido variable de adición (20 a 80 %) permite concluir que:

Cuando se reemplaza cemento por escoria y la finura del clinker se mantiene constante, el desarrollo de la resistencia a diferentes edades otorgada por esta adición dependerá de la distribución de tamaño de sus partículas. Las partículas de tamaño menor a 10  $\mu\text{m}$  cumplen un rol fundamental en la contribución de la resistencia mecánica a las primeras edades, mientras que partículas cuyos tamaños se encuentran comprendidos entre los 10 a 45  $\mu\text{m}$  contribuyen a edades más avanzadas.

Los valores registrados de  $t_{50}$  y de agua no evaporable de los cementos estudiados, permiten confirmar el aumento de la reactividad de la escoria a

primeras edades, generado por el incremento de su finura. De tal manera que, la pérdida de resistencia inicial comúnmente ocasionada en los cementos por la incorporación de escoria con finuras convencionales (en el orden de los 350 a 450 m<sup>2</sup>/kg) puede ser compensada a partir de la activación física de la adición.

## **CAPÍTULO III.- METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN**

### **3.1.-Introducción.**

En el presente proyecto se pretenden abordar desde la perspectiva de rastreo documental las variables, tipos y características del cemento portland, por la pertinencia y actualidad del mismo tema.

### **3.2 ANÁLISIS DE DATOS**

Dicha actividad se logra con el rastreo de artículos científicos que tienen que ver con las innovaciones del cemento portland.

### **3.3 DELIMITACIÓN DE LA MUESTRA DE ESTUDIO**

Se limita a las temáticas planteados en la construcción del objeto de estudio de la presente investigación.

### **3.4 RECOLECCIÓN DE DATOS**

Esta se volcó hacia las bibliográficas físicas y digitales especializadas en referencia a nuestro tema de investigación.

### **3.5 LUGAR DE INVESTIGACIÓN**

Escuela de Ingeniería de Mazatlán, Sinaloa, México.

### **3.6 PLANTEAMIENTO DE HIPÓTESIS**

La información académica y el conocimiento científico de frontera nos dan la certidumbre en las bases epistemológicas formativas y nos amplia nuestros marcos de referencia apoyándonos en las tomas de decisiones profesionales de gabinete y campo.

En la medida que los constructores y concreteras de la región sur de Sinaloa, tengan información de calidad con referencia científica de punta en base al proceso de fabricación y composición química del cemento Portland, teniendo así una mejor herramienta en la toma de decisión de uso y empleo del concreto.

### **3.7 INTRODUCCIÓN**

La metodología que se utiliza en esta investigación; es de carácter cualitativo y de corte descriptivo en su primera fase. Este planteamiento se

justifica utilizando conceptualizaciones y explicaciones, sobre la toma de diversas técnicas para el desarrollo de nuestra investigación.

### **¿Por qué investigación descriptiva?**

Este tipo de investigación comprende la descripción, registro, análisis de la naturaleza actual y la composición o procesos de los fenómenos.

*“La investigación descriptiva trabaja sobre las realidades de hecho, y su característica fundamental es la de representarnos una interpretación correcta”.*

*“Los estudios descriptivos buscan especificar las propiedades importantes de personas, grupos, comunidades, o cualquier otro fenómeno que sea sometido a análisis”.*

La investigación trata de establecer realidades, a partir de algunas recomendaciones. Es pertinente tomar el camino de la investigación descriptiva ya que como lo marca Mario Tamayo, la investigación descriptiva trata sobre:

- Las realidades de hecho, y una interpretación de los fenómenos actuales. Además, una razón que no nos permite salir del esquema de la investigación descriptiva es que también forman parte de la investigación los actores sociales que dan vida, transforman, y sienten en este entorno educativo, como lo dice Dankhe, la base del estudio descriptivo es especificar propiedades de personas, grupos, comunidades sometidos a un análisis.

### **¿Por qué utilizar técnicas cualitativas?**

Primero definamos el concepto según Kinner. Las técnicas cualitativas tienen como objetivo buscar información relacionada con las motivaciones, las creencias, los sentimientos y las actitudes de los encuestados. Entonces podemos resumir que las técnicas cualitativas son las que nos ayudaron a extraer

datos directos, de fuentes primarias que son en este caso los actores sociales del entorno educativo.

### **3.8 Técnicas De Investigación**

En este apartado se describen las técnicas que se utilizaron en el proceso de investigación en su forma conceptual y referidas a los autores que la describen, al final se hacen una serie de conclusiones sobre las técnicas ya enumeradas, mencionándose también algunas características que pretende alcanzar el informe final.

La observación es la técnica de investigación por excelencia; es el principio de la validación de toda teoría científica. Esta técnica es la más primitiva y la más actual en el proceso de conocimiento, esta incluye desde los procedimientos informales, como la observación casual, hasta lo más sistematizados, como los experimentos de laboratorio. Durante el proceso de esta investigación, la observación se utiliza desde el planteamiento del problema hasta la preparación del informe.



Los tipos de observación que se utilizaron en el proceso de investigación se muestran enseguida. La observación de campo es la que se realiza en el lugar donde se da el fenómeno observado. Realizar la observación de campo, requiere contar con una guía de información para recolectar los datos y para investigar los indicadores y las relaciones entre las variables. Este tipo de técnica, la hemos utilizado desde el primer acercamiento, en esta investigación, por la facilidad de su empleo y la bastedad de información que arroja. La observación estructurada, llamada también sistemática, apela a instrumentos para la recopilación de los datos o hechos observados. En una observación estructurada se sistematizan aspectos que se estiman relevantes para determinar la dinámica interna del grupo y ellos sirve de orientación al observar, con esta modalidad pueden utilizarse distintos medios que acrecientan notablemente la capacidad de observación y control; cuadros, notas, listados, escalas y dispositivos digitales.

El empleo de los dispositivos digitales da en esta investigación los registros, imágenes, sonidos, necesarios para el análisis de los datos de campo. Medios de observación, los medios e instrumentos de observación son los que facilitan, amplían o perfeccionan la tarea de observación realizada por el

investigador. Los que se utilizaron para fines de esta investigación son: el cuaderno de notas, mapas y dispositivos digitales, los cuales se definen a continuación, y cuál ha sido el empleo de dichos medios en este caso de estudio.

El cuaderno de notas, es una libreta que el observador lleva consigo, con el objeto de anotar sobre el terreno todas las informaciones. Los mapas, constituyen un auxilio muy valioso para la observación, sea cual fuere la índole de la investigación social, siempre será ubicarlo geográficamente con datos acerca de sus límites, situación, topografía, extensión, flora, fauna, clima, para guiar sus observaciones. Los dispositivos digitales pueden proveer una información muy objetiva y exacta de la realidad, (La cámara fotográfica, la cámara filmadora y el grabador de voz.)

La función que desempeñan estos tres medios de información en la investigación, es el registro de datos desde el campo, como es el caso del cuaderno que nos ha permitido consultar datos, sin necesidad de volver a la fuente, así como los dispositivos mecánicos que toman datos que no captábamos a simple vista, sin olvidar los planos que nos permitieron delimitar el área de estudio.

El siguiente método a utilizar es el análisis documental que se define de la siguiente forma: Es la base para construir el marco teórico de la investigación y es la más utilizada en todo tipo de disciplinas; implica que las fuentes de información se utilicen adecuadamente. Esta consulta es de gran importancia en los capítulos que conforman este estudio, pero ha cobrado más relevancia en el marco teórico.

La técnica cualitativa de investigación social que usamos es la entrevista, definiéndose esta como: La entrevista estructurada, llamada también formal o estandarizada. Esta forma de entrevista se realiza sobre la base de un formulario previamente preparado y estrictamente normalizado, a través de una lista de preguntas establecidas con anterioridad. Este tipo de entrevista presupone el conocimiento previo del nivel de la información de los encuestados y que el lenguaje del cuestionario sea comprensible para ellos de una manera unívoca.

La entrevista que se pretende utilizar en la fase de recolección de datos directos de los actores sociales, buscando los datos pertinentes sobre los temas de facilidades brindadas en el proceso de enseñanza y aprendizaje, actividades extracurriculares, formación integral de los estudiantes sobre la formación de

los estudiantes. Todos los instrumentos de recolección de datos se vacían en una tabla que denominamos: diseño de instrumentos para trabajo de campo.

Siguiendo esta tónica se describen también el tipo de instrumentos que se diseñaron, relacionando las categorías de investigación con los instrumentos de recolección antes citados.

La entrevista estructurada, es una parte medular de esta investigación, en la fase de recolección de datos se utilizará la misma, con los actores claves del área investigada, algunas ventajas que plantean en el uso de la entrevista son:

- Riqueza informativa
- Claridad y seguimiento de preguntas y respuestas
- Ventaja en la fase inicial
- Complementa otras actividades cualitativas.

La entrevista funciona bajo un acuerdo mutuo en el que se invita a verbalizar todo aquello que venga a la mente frente a una pregunta dada. La pregunta, elaborada en función de un guion, es considerada solo un disparador que posibilita que el entrevistado empiece a expresar, con la intensidad que desee, sus puntos de vista, conocimientos, experiencias y valoraciones sobre un tema en particular.

### **3.9 Universo Y Muestra.**

En la selección de informantes, las entrevistas cualitativas requieren un diseño flexible de la investigación. Ni el número ni el tipo de informantes se especifica de antemano. El investigador comienza con una idea general sobre las personas a las que entrevistará y el modo de encontrarlas, pero está dispuesto a cambiar de curso después de las entrevistas iniciales.

La estrategia del muestreo teórico puede utilizarse como guía para seleccionar las personas a entrevistar, (Glaser y Strauss, 1967). En el muestreo teórico el número de “casos” estudiados carece relativamente de importancia.

Lo importante es el potencial de cada “caso” para ayudar al investigador en el desarrollo de comprensiones teóricas sobre el área estudiada de la vida social.

Como vemos, el proceso de la selección de informantes es medular en la parte del proceso investigativo, por las características y la calidad de la información que se necesita, para la consolidación y comprobación de nuestro estudio, la selección de informantes y la conformación de la muestra, forman un punto clave en nuestro proceso de estudio. Las muestras dirigidas, como lo explica (Hernández, 1991, p. 226). Nos da pie a definir el concepto. La muestra dirigida selecciona sujetos “típicos”.

La ventaja de una muestra dirigida, es su utilidad para determinado diseño de estudio que requiere no tanto una “representatividad de elementos de una población, sino una cuidadosa y controlada elección de sujetos con ciertas características especificadas previamente en el planteamiento del problema”.

Una vez definido el concepto, encontramos tres tipos de muestras dirigidas los cuales se denominan como: La muestra de sujetos voluntarios,

muestra de expertos y muestras de sujetos tipo. De las cuales tomaremos muestra de expertos y muestras de sujetos tipo.

La muestra de expertos: en ciertos estudios es necesaria la opinión de expertos en un tema. Estas muestras son frecuentes en estudios cualitativos y exploratorios que para generar ideas más precisas o la materia prima del diseño de cuestionarios. Estas muestras son válidas y útiles cuando los objetivos del estudio así lo requieren.

Los sujetos tipo, también esta muestra se utiliza en estudios exploratorios y en investigaciones de tipo cualitativo, donde el objetivo es la riqueza, profundidad y la calidad de la información, no la cantidad ni la estandarización.

En estudios de perspectiva fenomenológica donde el objetivo es analizar los valores, ritos y significados de un determinado grupo social, el uso tanto de expertos, como de sujetos tipo es frecuente.

Entonces para llevar a cabo la presente investigación es necesario establecer el modelo de muestra documental y también de alguna manera a las personas que se relacionen con la misma, el sexo es indistinto, el grupo de edad requerido es abierto, la clasificación de los candidatos a conformar esta muestra es dependiendo de su perfil o grado, la cual se elaborará en referencia con los resultados de campo.

Continuando con el diseño de instrumentos se elaboraron una serie de fichas de trabajo, la primera es para detectar a los actores clave, la siguiente es la relacionada con el diseño de instrumentos y la última se relaciona con el resumen de opiniones de los actores claves de esta investigación.

Posteriormente se diseñó una presentación con la información relacionada con las categorías investigadas, dicho trabajo se pretende codificar con un programa de computadora y ayudará al entendimiento de los cuestionamientos que se detallaran en la aplicación de la entrevista de ser necesario.



### **3.10 La Entrevista, Observación, Dispositivos Digitales.**

#### **La Observación**

No solamente es la más universal si no la más antigua, porque coloca al investigador frente a la realidad de manera inmediata, la captación de lo que acontece en el entorno del investigador es de tipo sensorial, y como tal puede estar sesgada a partir de las limitaciones propias de los sentidos, por lo que se recomienda que sea:

a) Estructurada: Porque el investigador previamente tiene que delimitar qué aspectos va a observar escogiendo lo que es más importante a lo que le interesa. Así mismo es muy conveniente que el investigador se ponga en contacto con la realidad para de esa forma tener en cuenta un interés real por conocer lo que acontece a su alrededor, “Lo Estructurado es lo que no previamente se elabora”.

b) Participante: Se refiere a la intervención personal o directa de quien dirige la investigación o cuando se utiliza a otras personas para recoger

información significa también que es una garantía de la objetividad que se pretende dar a la información recogida.

### **Entrevista**

Es una conversación por lo cual se quiere averiguar datos específicos sobre la información requerida. Incluye la opción de selección previa a quien o quienes se va a realizar. Igualmente, no puede ser aplicada a cualquiera, sino establecer previamente con el entrevistado los objetivos, tiempo y la utilización de tales resultados. Esta técnica tiene la desventaja de ser aplicada a pocas personas y de trabajar luego sobre aquellas respuestas que sean útiles; así mismo no garantiza que toda la intervención pueda ser asumida como objetiva.

### **La Encuesta o Cuestionario**

Es una recopilación de opiniones por medio de cuestionarios o entrevistas en un universo o muestras específicos, con el propósito de aclarar un asunto de interés para el encuestador. Se recomienda buscar siempre agilidad y sencillez en las preguntas para que las respuestas sean concretas y centradas sobre el tópico en cuestión.

Tiene la ventaja de formular preguntas a más personas quienes proporcionan información de sus condiciones económicas, familiares, sociales, culturales y Políticas y en los que el anonimato constituye una ventaja porque no puede personalizarse las respuestas. Su desventaja está en la garantía de su aplicación, porque al requerir la intervención de muchas personas no se puede asegurar que estos cumplan con el cometido de recoger información que se necesita, otra limitación proviene de la posible falsedad de las respuestas o cuando no se completa el cuestionario, no permitiendo establecer generalizaciones amplias.

## **CAPÍTULO IV.-RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

### **4.1 Conclusiones.**

#### **4.1.1 Sostenibilidad de la fabricación del cemento.**

El cambio climático es uno de los factores que deben ser considerados hoy en día para cualquier práctica que realicen los seres humanos. Las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y monóxido de carbono (CO) han transformado el clima en un factor ambiental más activo, por lo cual la sostenibilidad cada vez juega un papel más importante y es un factor que debe estar presente en todos los proyectos, además que involucra tres aspectos fundamentales, los cuales son: economía, sociedad y medio ambiente.

#### **4.1.2. El concreto como material sostenible.**

Los pavimentos contruidos con **concreto** ofrecen ventajas significativas como alternativa sostenible frente a pavimentos contruidos con otro tipo de materiales, entre las que se destacan: durabilidad, mayor reflexión de la luminosidad y mayor seguridad bajo condiciones de poca iluminación debido a su color claro, lo que implica al mismo tiempo un menor consumo de energía para la iluminación.

El concreto cuenta con un albedo alto en comparación con otros materiales usados en la industria de la construcción, por lo cual su aporte para la disminución del efecto de isla de calor y en general al calentamiento global es significativo.

Por ejemplo, en el caso de pavimentos, según estudios de la Universidad de California las superficies de concreto contribuyen a una reducción entre 25 y 38 kg/m<sup>2</sup> de CO<sub>2</sub> en comparación con las superficies de otros materiales.

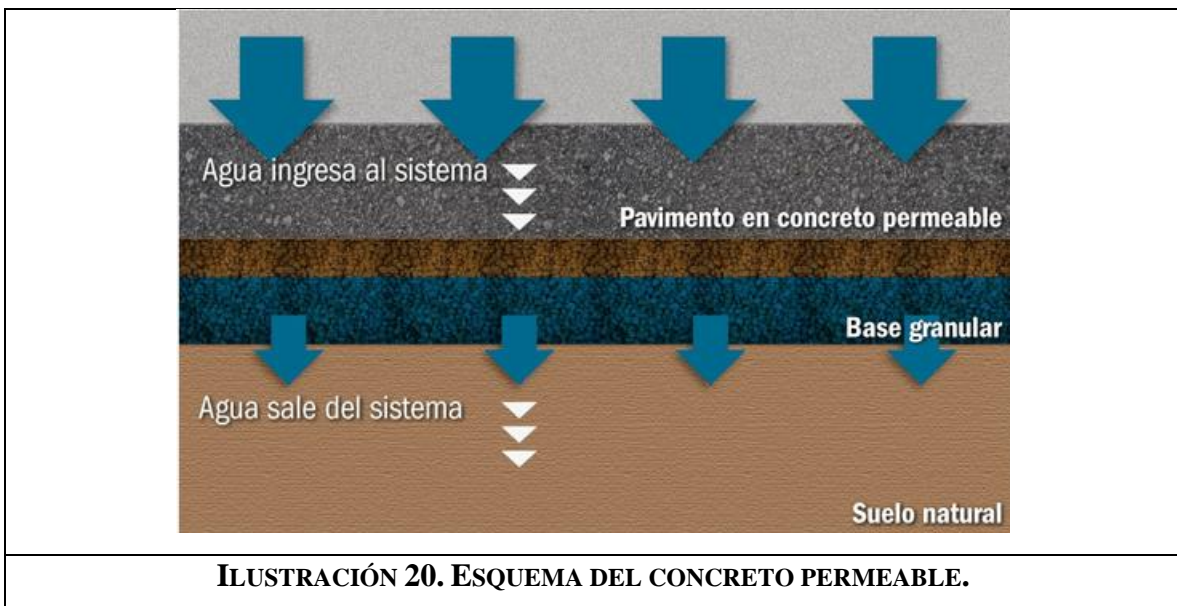
#### **4.1.3. Concreto permeable.**

El concreto como material sostenible ha desarrollado ampliamente su versatilidad, es por eso que el concreto permeable es considerado uno de los que más ayudan a reducir o mitigar el impacto de la construcción en el medio ambiente. Este tipo de concreto es una mezcla de alta porosidad, que se obtiene por la interconexión de vacíos. Los poros que están interconectados tienen en promedio tamaños entre 2 y 8 mm; permitiendo de esta forma el paso del agua fácilmente a través de la estructura.

Este tipo de concreto se ha desarrollado con el fin de mejorar los sistemas de drenaje en muchas partes del mundo, ya que de esta forma se permite el libre paso del agua y la recolección y absorción de esta de forma eficiente. Aunque los concretos permeables se utilizan en la mayoría en la superficie de rodadura de pavimentos, también es utilizado para la construcción de bases permeables, bordes de desagües, bases y sub bases. Dentro de los ejemplos de estructuras construidas con este tipo de concretos se encuentran: pavimentos en estacionamientos de poco tráfico, pavimentos de plazas y parques, andenes, filtros y drenajes para pavimentos.



La sostenibilidad es un parámetro relativo y para el caso de la industria del concreto se han hecho grandes esfuerzos para el cumplimiento del Protocolo de Kioto; la valorización de residuos, el control de incineración de residuos, la aplicación de las mejores técnicas disponibles de producción y la implantación de sistemas de gestión medio ambientales certificados, todo ello, durante el proceso de producción del cemento, aumenta la sostenibilidad de la construcción de concreto.



Una de las principales ventajas que ofrece este tipo de concreto se encuentra en la posibilidad de prescindir de otras estructuras debido a necesidades especiales (por ejemplo: estructuras de retención, cunetas, sumideros).

Su vida útil de entre 20 y 40 años, logra reducir el impacto urbano permitiendo el paso de oxígeno y las altas temperaturas y ahorro de energía en la iluminación artificial.

El concreto permeable se logra a través de una mezcla de agregados, cemento y agua; en donde se tiene muy poca arena o en algunos casos se elimina del todo, lo que contribuye a crear espacios vacíos alrededor de los agregados gruesos.

Tradicionalmente se usa en estacionamientos, áreas de tránsito ligero, paso de peatones, entre otras aplicaciones. Su gran ventaja es permitir que el agua de las precipitaciones pluviales se filtre a través de su estructura porosa, lo que reduce el escurrimiento de aguas contaminadas.

Aunque es cierto, que este tipo de concreto se ha utilizado durante muchos años, cada vez ha ganado mayor atención debido a que se le considera un material que aporta a la sostenibilidad por su eficiente manejo de las aguas pluviales.



En especial porque la utilización de este tipo de concreto hace un aporte a la certificación LEED®: este producto puede contribuir a la obtención de los siguientes créditos: sitios sostenibles (manejo de aguas lluvias, reducción del efecto isla de calor) y materiales y recursos (transparencia y optimización de los productos de construcción).

#### **4.1.4. La fabricación del cemento y el medio ambiente.**

Los aspectos ambientales más importantes de la fabricación de cemento son el consumo energético y la emisión a la atmósfera de partículas y de gases de combustión (óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y óxidos de azufre (SO<sub>2</sub>)). Las partículas (polvo), provienen de las operaciones de almacenamiento, transporte y manipulación de los materiales (fuentes dispersas o difusas), y de los filtros de desempolvado (fuentes localizadas).

La medición de las emisiones en fuentes localizadas es necesaria para cumplir con los límites de emisión. Las emisiones del horno dependen de las propiedades de las materias primas (humedad, contenido en compuestos sulfurosos volátiles, dificultad de cocción, etc.) y del tipo de horno empleado (vías húmeda, semihúmeda, semiseca o seca).

## **4.2. Recomendaciones.**

- Almacenamiento en buen estado:

Durante el almacenamiento, el cemento debe estar colocado a una altura mínima de 10 centímetros sobre un entarimado, para evitar el contacto con la humedad. Debe estar separado de los muros y apilado de 8 a 10 bultos como máximo. El cemento debe estar cubierto si hay riesgo de lluvia y sobre una base lejos de la humedad. Se debe verificar que el bulto no contenga piedras o grumos, originados por fraguados parciales, debido a la antigüedad o a una elevada humedad en el ambiente.

- La calidad del agua:

El agua que se usa para elaborar el concreto debe ser potable, ya que de su pureza depende en gran medida la calidad del concreto. Debe estar libre de ácidos, limos, sales y grasas; ya que las impurezas disueltas en el agua o presentes en forma de suspensión, pueden interferir con el proceso de hidratación del cemento, retrasando así el tiempo de fraguado y reduciendo la resistencia del concreto. Además, para obtener una determinada resistencia del

concreto, es importante medir las cantidades requeridas de arena, cemento, grava y agua.

## BIBLIOGRAFÍA.

- Clinker

<https://www.cemex.es/productos-y-soluciones/clinker>

- Materias Primas, Sostenibilidad de la fabricación del cemento.

<https://personal.ua.es/es/servando-chinchon/documentos/-gestadm/material-docente/21-cemento-portland-proceso-de-fabricacion.pdf>

- El concreto como material sostenible.

<https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/el-concreto-como-material-sostenible>

- ACI 233 (1999), "Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete", *ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, Materials and General Properties of Concrete*, Michigan, USA.

- Boldyrev, V.V., Pavlov, S.V., Goldberg, E.L. (1996), "Interrelation between fine grinding and mechanical activation", *International Journal of Mineral Processing*, Elsevier, Oxford, England, 44-45, pp. 181-18.

- Bonavetti, V.L. (2004), "Hormigón con elevado contenido de adiciones (Green Concrete)", *Hormigones Especiales*, Editado por la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Buenos Aires, Argentina, pp. 97-142.

- Bonavetti, V.L., Menéndez, G., Donza, H.A., Rahhal, V.F., Irassar, E.F. (2006), "Cementos compuestos conteniendo puzolana natural y escoria

granulada de alto horno", *Materiales de Construcción*, Madrid, España, 56 (283), pp. 25-36.

- Bougara, A., Lynsdale, C., Ezziane, K. (2009), "Activation of Algerian slag in mortars", *Construction and Building Materials*, Elsevier, Oxford, England, 23 (1), pp. 542-547.
- Carrasco, M.F., Menéndez, G., Bonavetti, V.L., Irassar, E.F. (2005), "Strength Optimization of Tailor Made Cement with Limestone Filler and Blast Furnace Slag", *Cement and Concrete Research*, Elsevier, Oxford, England, 35 (7), pp. 1324-1331.
- Giaccio, G., Giovanbattista, A., Zerbino, R. (1991), "Propiedades de los hormigones elaborados con alto volumen de puzolanas naturales", *Revista Hormigón*, Buenos Aires, Argentina, 20, pp. 5-14.
- Hooton, R.D. (1987), "The reactivity and hydration products of blast-furnace slag", *Supplementary Cementing Materials for Concrete*, Ed. Malhotra V.M, Canadá, Chapter 4, pp. 291-333.
- Khatri, R.P., Sirivivatnanon, V. (1995), "Effect of different supplementary cementitious materials on mechanical properties of high performance concrete", *Cement and Concrete Research*, Elsevier, Oxford, England, 25 (1), pp. 209-220.
- Knudsen, T. (1980), "On Particle size distribution in cement hydration", *Proc. 7th Congress on the Chemistry of Cement*, París, France, II, pp. 170-175.

- Niu, Q., Feng, N., Yang, J., Zheng, X. (2002), "Effect of superfine slag powder on cement properties", *Cement and Concrete Research*, Elsevier, Oxford, England, 32 (4), pp. 615-621
  
- Malhotra, V.M. (1987), "Properties of fresh and hardened concrete incorporating ground, granulated, blast-furnace slag", *Supplementary Cementing Materials for Concrete*, Ed. Malhotra V.M, Canadá, Chapter 5, pp. 291-333. Malhotra, V.M, Hemmings, R. T. (1995), "Blended cements in North America-A review", *Cement and Concrete Composites*, Elsevier, Oxford, England, 17 (1), pp.23-35.
  
- Mehta, P.K. (1999), "Advancements in concrete technology", *Concrete International*, Michigan, USA, 21 (6), pp. 69-76.
  
- Mehta, P.K. (1999), "Concrete technology for sustainable development", *Concrete International*, Michigan, USA, 21 (11), pp. 47-53.
  
- Mehta, P.K. (1989), "Pozzolanic and cementitious by-products in concrete-another look", *ACI SP 114*, Ed. Malhotra V.M, Noruega, Chapter 1, pp.1-43. Menéndez, G., Bonavetti, V.L., Irassar, E. F. (2007), "Hormigones con cementos compuestos ternarios. Parte II: Mecanismos de transporte", *Materiales de Construcción*, Madrid, España, 57 (285), pp. 31-43.
  
- Menéndez, G., Bonavetti, V.L., Irassar, E. F. (2003), "Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast-furnace slag", *Cement and Concrete Composites*, Elsevier, Oxford, England, 25 (1), pp. 57-63.

- Montgomery, D., Runger G. (1996), "*Probabilidad y Estadística Aplicadas a la Ingeniería*", Mc Graw Hill, México, pp. 787.
- Powers T.C. (1949), "The non evaporable water content of hardened portland cement paste", *ASTM Bulletin 158*, Philadelphia, USA, pp. 68-75.
- Sivasundaram, V., Malhotra, V.M., (1992), "Properties of Concrete incorporating Low Quantity of Cement and High Volumes of Ground Granulated Slag", *ACI Materials Journal*, Michigan, USA, 89 (6), pp. 554-563.
- Swamy, R.N. (1997), "Design for Durability and Strength Through the Use of Fly Ash and Slag in Concrete", *ACI SP 171*, Ed. Malhotra V.M, pp. 1-72.
- Swamy, R.N., Bouikni, A. (1990), "Some Engineering Properties of Slag Concrete as Influenced by Mix Proportioning and Curing", *ACI Materials Journal*, Michigan, USA, 87 (3), pp. 210-220.
- Tsuyuki, N., Koizumi, K. (1999), "Granularity and Surface Structure of Ground Granulated Blast Furnace Slag", *J.American of Ceramic Society*, Westerville, USA, 82 (8), pp. 2188-2192.
- Wan, H., Shui, Z., Lin, Z. (2004), "Analysis of geometric characteristics of GGBS particles and their influences on cement properties", *Cement and Concrete Research*, Elsevier, Oxford, England, 34 (1), pp. 133-137.
- Wang, P.Z., Trettin, R., Rudert, V. (2005), "Effect of fineness and particle size distribution of granulated blast furnace slag on the hydraulic

reactivity in cement systems", *Advances in Cement Research*, Elsevier, Oxford, England, 17 (4), pp. 161-166.

- Zhang, C., Wang, A., Tang, M., Liu, X. (1996), "The filling role of pozzolanic material", *Cement and Concrete Research*, Elsevier, Oxford, England, 26 (5), pp. 943-947.