

3. EXPERIMENTAL

3.1 MATERIALES

A continuación se describen las características más importantes de los materiales utilizados en la fabricación de muestras de morteros y hormigones.

3.1.1 CEMENTO PORTLAND GRIS.

En los morteros y hormigones fabricados se usó cemento Portland gris tipo I proveniente de la empresa Argos en Colombia. La composición química del cemento se describe en la Tabla 5.

Tabla 5 Composición química del cemento Portland tipo I

COMPUESTO (%)							
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	P.F*	R.I**
19,05	5,79	2,94	62,74	1,03	2,18	4,18	0,49

* Pérdida al fuego **Residuo insoluble

3.1.2 ÁRIDOS FINOS Y GRUESOS

En la fabricación de morteros con jugo de fique y aditivo comercial, se utilizó arena de Ottawa estándar con la granulometría establecida en la norma ASTM C33-03. (22)

Para los hormigones se utilizaron áridos finos y gruesos, suministrados por la empresa Canteras de Colombia, ubicada en la ciudad de Medellín. Las arenas usadas son de río y el árido grueso es triturado de 19,00 mm de tamaño máximo nominal. Las características físicas de los áridos obtenidas en el laboratorio se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6 Características físicas del los áridos

Característica	Árido fino	Árido grueso
Módulo de finura	2,63	5,61
Absorción (%)	2,33	0,5
Densidad aparente seca (g/cm ³)	2,55	2,94
Color	Tonalidades amarillentas	Tonalidades negruzcas
Forma de las partículas	Redondeadas y angulares	Angulares

La granulometría para los áridos utilizados se presenta en la Figura 24 y Figura 25.

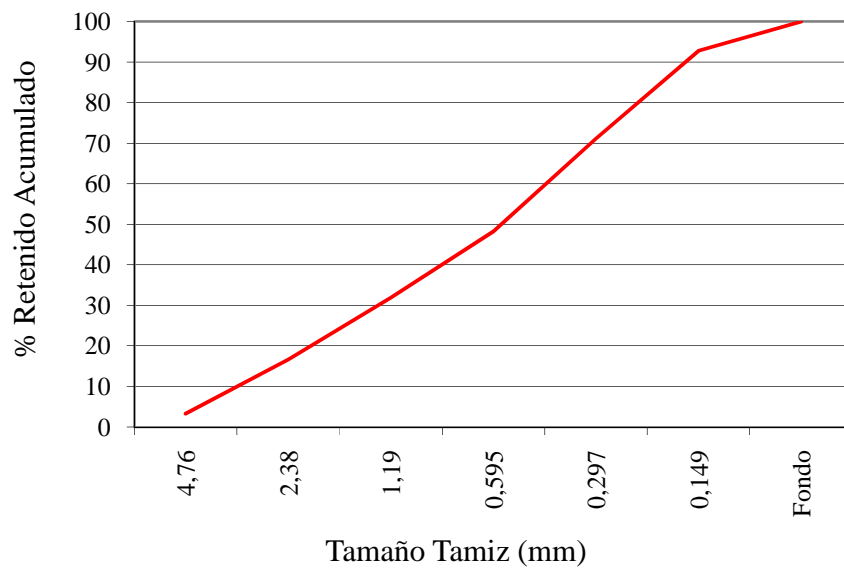


Figura 24 Curva granulométrica del árido fino

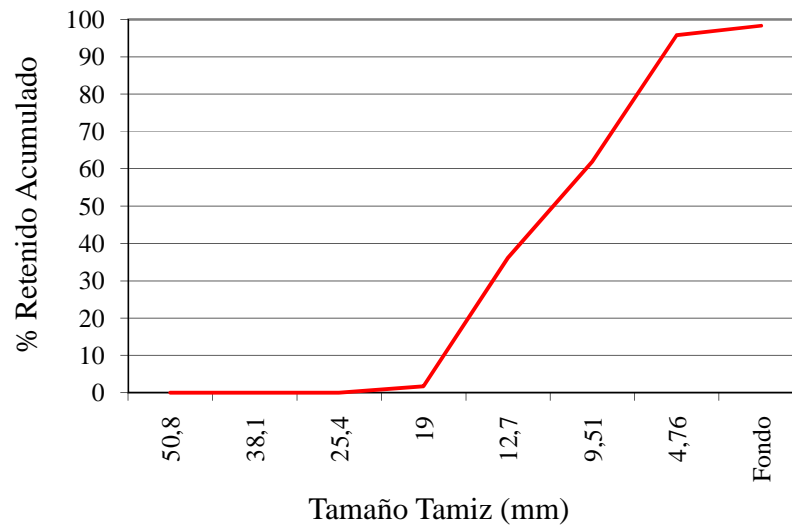


Figura 25 Curva granulométrica del árido grueso

La distribución de las partículas en los áridos mostró una adecuada gradación para la realización de los ensayos.

3.1.3 AGUA

El agua que se utilizó en los ensayos es la que abastece las Empresas Publicas de Medellín (EEPPM) a la Universidad Nacional de Colombia (Sede Medellín).

Para la fabricación de hormigón se establecen ciertas características que debe cumplir el agua, las cuales se definen en la norma NTC 3459 (23). En la Tabla 7 se presentan las propiedades más importantes del agua utilizada en los ensayos en comparación con lo exigido en la norma mencionada anteriormente.

El agua utilizada en los ensayos cumple apropiadamente con los parámetros estipulados en la norma.

Tabla 7 Propiedades del agua utilizada en los ensayos

Compuesto	Niveles según NTC 3459	Niveles promedioagua EEPPM
Cloruros	< 500 mg/L	4.9 mg/L
Sulfatos	< 1000 mg/L	14.6 mg/L
Carbonatos y bicarbonatos de álcalis	Total combinado < 1000 mg/L	41 mg/L (Dureza total, CaCO ₃) 33.3 mg/L (Alcalinidad, como CaCO ₃)

3.1.4 JUGO DE FIQUE .

Para los ensayos en morteros y hormigones se usó el licor de la planta conocida científicamente como *Furcraea Cabuya*, de nombre vulgar: cabuya hembra o fique cenizo. El origen fue el Centro Comunitario de Beneficio de Fique de la vereda Pantanillo, en el municipio de Girardota (Departamento de Antioquia, Colombia).

El jugo de fique es una suspensión con características variables, dependiendo de la edad de la planta, la estación del año y la fertilidad del suelo, es de color verde ocre y corrosivo. Su densidad medida experimentalmente es de 1,02 kg/L y su pH varía entre 4 y 5; también sufre una rápida fermentación por lo cual es necesario conservarlo a bajas temperaturas menores a los 15°C. En general la composición del jugo se conoce de forma cualitativa. (18)

El jugo está conformado principalmente por agua, celulosa, materia orgánica y minerales como potasio, calcio, fósforo, urea y nitrógeno. La materia orgánica del jugo la constituye la sacarosa, proteínas, esteroides, saponinas y sapogeninas En la Tabla 2, del numeral 2.6 se presenta la composición porcentual para los componentes mencionados que corresponden a los promedios para las variedades de fiques cultivados definidas por otras investigaciones relacionados. (19)

Algunos datos de importancia que se tuvieron en cuenta, fueron los obtenidos en algunas investigaciones recientes sobre el licor de plantas *Agavaceas*, donde se encontraron características similares entre el licor de la planta *Furcraea cabuya* (fique cenizo) y las de *Agave americana* (4). Estos datos fueron de importancia para conocer la naturaleza del aditivo y explicar su comportamiento en los morteros y hormigones ensayados.

Algunos aspectos a destacar del jugo de fique son (4):

- Los sólidos presentes están representados fundamentalmente por materia orgánica y carbonatos.
- Debido a su naturaleza ácida, pueden tener una rápida fermentación y por lo tanto requieren de una buena conservación.
- Los contenidos de azúcar hacen sospechar que puede actuar como retardante de la hidratación del cemento.
- Su peso específico es de $1,06 \text{ g/cm}^3$.
- El jugo de la *Furcraea cabuya* presenta mayores cantidades de residuo sólido y mayor cantidad de agua que la planta de *Agave americana*.

En la presente investigación se realizaron ensayos físico-químicos adicionales como la formación de espuma y estabilidad, extracto seco convencional, pérdidas por calcinación y pH. Los procedimientos para estos ensayos describen en el numeral 3.2.

3.1.5 AIREANTE COMERCIAL

Con el objeto de comparar algunas propiedades medidas en los ensayos de morteros y hormigones, se usó un aditivo aireante comercial denominado AIRTOC-D de la empresa Toxement. Las características de acuerdo con el proveedor se describen en la Tabla 8.

Tabla 8 Características del aditivo aireante AIRTOC-D (24)

Característica	Valor
Aspecto	Líquido
Color	Café ámbar
Densidad	1,05 kg/L
pH	12±1,0
Componentes principales	Solución estable a base de resinas neutralizadas

En el desarrollo de este trabajo se denominará “Comercial” para las muestras elaboradas con él.

3.1.6 OTROS

Se utilizaron adicionalmente dos reactivos para el ensayo de exposición a los sulfatos (ver Tabla 9)

Tabla 9 Características de otros reactivos utilizados

Reactivo	Pureza (%)	Casa comercial
Sulfato de Sodio	100	Merck S.A.
Ácido Sulfúrico	98	Químicos J.M

También para ejecutar y facilitar otros procedimientos, como los ensayos de densidad en muestra seca y succión capilar, así como el desencofrado de moldes, se utilizaron kerosene, un hidrófugo y desmoldante, respectivamente, de tipo comercial.

3.2 PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES Y EQUIPOS

3.2.1 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA.

La caracterización físico química de un aditivo tiene como objetivo identificar su composición, como medio para poder entender y explicar los mecanismos de su actuación en los morteros y hormigones de cemento Pórtland.

3.2.1.1 Formación de espuma (foaming power).

Este ensayo se realizó teniendo en cuenta la norma ISO 696 establecida para surfactantes y pruebas de espumación previamente realizada para algunas investigaciones con el jugo de fique para la determinación de saponinas con la formación de espuma. (25) (19)

El ensayo se realizó mediante el uso de los siguientes elementos de laboratorio: probeta gradada de 1000 ml, bureta de 200 ml, soporte metálico para montaje, cronómetro. Con estos elementos se realizó el montaje medir la solución surfactante. El método consiste en la medición del volumen de espuma obtenida después de dejar fluir libremente la solución a medir desde una altura de 450 mm en la superficie de un líquido de la misma solución (50 ml). El montaje realizado para el ensayo se puede observar en la Figura 26.

El procedimiento para la realización del ensayo es el siguiente:

- Montaje de los elementos a la altura de flujo (450 mm)
- Preparación de elementos volumétricos con la solución: para llenar la bureta y los 50 ml en la probeta es necesario tener especial cuidado para evitar la formación de espuma con la solución.
- Permitir que la solución fluya libremente sin interrupción y medir el tiempo de flujo con el cronómetro. Todas las mediciones en las cuales el tiempo de flujo difiera en más del 5% de la media se deben rechazar.
- Medir el volumen de espuma formada a los 30 s, 3 min y 5 min luego de que la solución haya terminado de fluir. Si al medir la espuma el nivel superior presenta una depresión en el centro, la lectura será la media aritmética entre el centro y el borde.

3.2.1.2 Determinación del extracto seco convencional.

Este ensayo tiene como objeto determinar el contenido de residuo seco (extracto seco convencional), a $105 \pm 3^\circ\text{C}$, en los aditivos líquidos para hormigones, morteros y pastas. El procedimiento se hizo siguiendo la norma española UNE-EN 480-8.

Los aparatos utilizados son: crisol para evaporación de fondo plano, desecador, estufa con regulador termostático a $105 \pm 3^\circ\text{C}$, balanza analítica (Ver Figura 27).

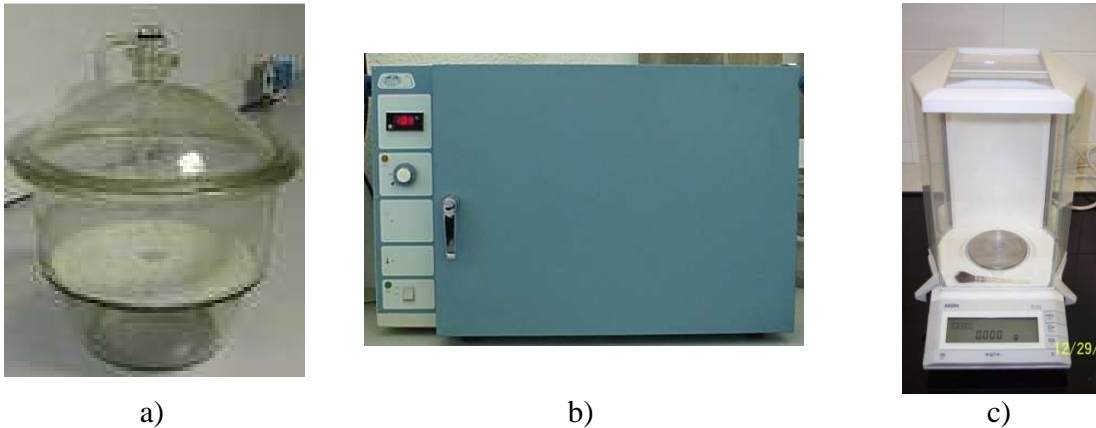


Figura 27 Equipos para el ensayo de extracto seco convencional, a) Desecador, b) Estufa con regulador termostático, c) Balanza analítica

El crisol para evaporación se calienta durante al menos una hora a $105 \pm 3^\circ \text{C}$. Se pesa después de enfriarla en un desecador. Se pesa una masa entre 5 g y 10 g de aditivo líquido con una exactitud de 0,001 g. Se coloca la muestra en la estufa precalentada a $105 \pm 3^\circ \text{C}$ y se mantiene durante 4 horas después de lo cual se pasa a un desecador y se pesa hasta constancia de masa.

El resultado se expresa en tanto por ciento en masa y se calcula por medio de la expresión:

$$X = \frac{R}{M} \times 100 \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

X es el extracto seco en masa, en tanto por ciento

R es la masa del residuo, en gramos

M es la masa del aditivo, en gramos

3.2.1.3 Pérdidas por calcinación.

Tiene por objeto determinar la pérdida de masa que experimentan los aditivos para hormigones, morteros y pastas cuando se someten a $1050 \pm 25^\circ \text{C}$, hasta constancia de masa. Se determina por pesada del residuo seco obtenido a $105 \pm 3^\circ \text{C}$ y del que queda cuando éste se somete a la acción del calor a $1050 \pm 25^\circ \text{C}$, hasta constancia de masa.

Este ensayo se realizó siguiendo la norma española UNE 83-207-85. El equipo utilizado es: material corriente de laboratorio, horno de mufla, cápsula de platino o de porcelana.

La cápsula de porcelana que contiene el residuo seco del aditivo líquido (extracto seco convencional), se introduce durante una hora en el horno de mufla 1050 °C. Transcurrido este tiempo, se saca la cápsula del horno; se pasa por un desecador donde se deja enfriar, durante 30 minutos, hasta la temperatura ambiente y, a continuación se pesa con una precisión no inferior a $\pm 0,001$ g. Se vuelve a introducir la cápsula en el horno de mufla durante 15 minutos; se pasa al desecador, donde se deja enfriar durante 30 minutos y se pesa con la precisión anterior. (26)

Los resultados se expresan en tanto por ciento en masa, con relación a la cantidad de aditivo ensayado, y se calculan por medio de la siguiente expresión:

$$PI(\%) = \frac{M_3 - M_1}{M_2 - M_1} \times 100 \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

PI_1 es la pérdida por calcinación , en porcentaje

M_1 es la masa de la cápsula, en gramos

M_2 es la masa de la cápsula con el residuo seco a 105° C

M_3 es la masa de la cápsula con el resto del aditivo, sometido a 1050 ± 25 °C

3.2.1.4 Determinación del pH.

Para la determinación del pH de las muestras estudiadas se siguió el método de la norma española UNE 83-227-86. El equipo utilizado se muestra en la Figura 28.

A partir del aditivo homogenizado, se toman tres muestras de 100 ml, y a continuación, se realiza a 20 ± 2 ° C, sobre cada una, la medida del pH, una vez tarado según las especificaciones técnicas del fabricante.

Posteriormente se preparan tres muestras de 10 ml, cada una, del aditivo y se diluyen en 100 ml de agua desionizada, se homogenizan, se agitan y se realiza, en cada muestra, a 20 ± 1 °C, la determinación del pH.

Los resultados se expresan con una cifra decimal, a $20 \pm 1^\circ \text{C}$. Dichos resultados son la media aritmética de las tres medidas realizadas, si ninguno de los tres valores se diferencia en más de 0,2 unidades de dicha medida. En caso contrario, se indican los valores individuales (27).



Figura 28 Medidor de pH de sensibilidad 0,01 unidades de pH

3.2.2 ENSAYOS EN MORTEROS.

3.2.2.1 Consistencia normal.

La consistencia normal del cemento se determinó según la norma *ASTM C187*, (equivalente a la NTC 110), la cual permite identificar la cantidad de agua necesaria para una plasticidad específica de la pasta. El procedimiento se realiza calculando la cantidad de agua a ensayo y error para una cantidad de muestra determinada hasta que la sonda de diámetro de 10 mm del aparato Vicat, utilizado de marca Soiltest, penetra en la pasta $10 \pm 1 \text{ mm}$ (ver Figura 29a). Y se realiza luego el cálculo de acuerdo con la ecuación 3:

$$\%CN = \frac{W_w}{W_c} \times 100 \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

% CN = Porcentaje de humedad del cemento en consistencia normal

W_w = Peso del agua en g. Con la que se consiguió la penetración de la sonda de $\varnothing 10$ mm en la pasta entre los rangos 10 ± 1 mm.

W_c = Peso del cemento en g.

3.2.2.1 Fluidiez.

La fluidez se determinó de acuerdo a la norma *ASTM C1437* (equivalente a la NTC 111), la cual indica la cantidad de la plasticidad necesaria de un mortero para realizar los cubos para fallar a compresión. El procedimiento se realiza variando la cantidad de agua y usando diferentes porcentajes de jugo de fique o aditivo comercial, a ensayo y error para una cantidad de muestra determinada, depositando el mortero en una mesa de leva haciendo que la muestra caiga 25 veces en 15 segundos y finalmente se miden cuatro diámetros de la muestra y se determina el promedio (ver Figura 29b).

La mezcla de los morteros se realizó de acuerdo con el procedimiento establecido en la norma *ASTM C305* (equivalente a la NTC 112) (28), usando una mezcladora mecánica accionada eléctricamente, con paleta mezcladora, recipiente de mezcla y raspador (ver Figura 29c).

El agua o la cantidad de jugo de fique necesarias, serán las que permitan una fluidez entre 105 y 115% según la siguiente ecuación:

$$\% F = \frac{(\varnothing_{Pr\ omf} - \varnothing_{inicial})}{\varnothing_{inicial}} \times 100 \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde

$\% F$ Porcentaje de fluidez

\varnothing_{promf} Diámetro promedio final que se obtuvo con la muestra

$\varnothing_{inicial}$ Diámetro de la base del molde con el cual se deposita el mortero en la mesa de leva y equivale a 101.6 mm (4 in.)



a)



b)



c)

Figura 29 Equipos para ensayos de consistencia y fluidez, a) Aparato de Vicat, b) Mesa de flujo c) Amasadora mecánica

3.2.2.2 Resistencia mecánica a la flexión

La resistencia mecánica a flexión se realizó bajo la norma *ASTM C348* (equivalente a la *NTC 120*), usando probetas prismáticas de 160 mm x 40 mm x 40 mm que se usaron para la medición de la resistencia a la compresión una vez falladas.

Los aparatos utilizados son los siguientes:

- Mezcladora amasadora (ver Figura 29c)
- Espátula
- Moldes con base (ver Figura 30a)
- Rascador
- Mesa compactadora
- Prensa de flexión (ver Figura 30b)



a)



b)



c)

Figura 30 Equipos para resistencia mecánica a la flexión, a) Moldes con base para probetas de 160 mm x 40 mm x 40 mm, b) Prensa de flexión, c) Mesa compactadora

Para la preparación de las probetas de ensayo se debe amasar según el procedimiento indicado para la fluidez en el numeral 3.2.2.1.

Inmediatamente después de la preparación, se usan los moldes utilizados de acero que disponen de tres compartimentos horizontales para la preparación simultánea de tres probetas, con un espesor de pared de 10 mm. Cada molde está provisto de una placa base, de acero mecanizado; el conjunto del molde ensamblado, permanece rígidamente unido y fijado a la base.

El molde limpio se asegura en la mesa compactadora, se aplica una capa fina de aceite de desmoldeado a las caras internas. La compactadora utilizada está compuesta de una mesa rectangular, unida rígidamente por dos brazos ligeros a un eje de rotación, que distan 800 mm del centro de la mesa (ver Figura 30c).

Durante el funcionamiento, la mesa es levantada por una leva de acero, que le permite caer libremente desde una altura de 15 mm. El accionamiento de la leva se hace por medio de un motor eléctrico, a una velocidad uniforme de una revolución por segundo. Un dispositivo de control y un contador regulan el periodo de compactación a 60 golpes. El molde se llena en dos capas de mortero y se compacta cada una con los golpes.

Para el curado de las probetas se utiliza una cámara húmeda en la que se mantienen las condiciones de temperatura y humedad constantes donde las probetas permanecen hasta la edad de rotura en la prensa de flexión.

La resistencia a la flexión P_F se calcula con la ecuación:

$$P_F = 0,0028 \times P \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde

P_F es la resistencia a flexión en MPa

P total carga máxima en N

3.2.2.3 Resistencia mecánica a la compresión

La resistencia mecánica a compresión es la carga necesaria para comprimir una probeta hasta su rotura. Este ensayo se realizó de acuerdo con la norma *ASTM C349* que determina

la aplicación de carga a los trozos rotos de las probetas precedentes del ensayo de resistencia a flexión bajo la norma *ASTM C348*.

Los equipos necesarios para este ensayo son prácticamente los mismos utilizados para el ensayo a flexión. Solo varía la prensa que es una prensa para compresión (ver Figura 31).



Figura 31 Prensa utilizada en los ensayos a compresión de morteros

Los trozos de las probetas se colocan con sus caras laterales hacia arriba y hacia abajo entre los dos platos de acero de la prensa de compresión, de forma que los lados de la probeta que estuvieron en contacto con las caras del molde estén en contacto con los platos de la prensa en una sección de 40 mm x 40 mm. La carga debe aplicarse sobre la probeta hasta su rotura.

Debe calcularse el valor medio de los seis valores obtenidos. La resistencia a compresión P_c viene dada por la fórmula:

$$P_c = 0,00062 \times P \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde

P_c es la resistencia a compresión en MPa

P total carga máxima en N

3.2.2.4 Absorción Capilar

El ensayo de succión capilar permite identificar el coeficiente de absorción capilar, la porosidad total y la densidad. Para iniciar el ensayo se secaron a determinada edad de hidratación (7 y 28 días) las probetas cilíndricas de 2" de Ø por 4" de alto, en un horno a 60°C de temperatura, se enfriaron en un desecador (ver Figura 32a) y se impermeabilizaron en la pared lateral dejando las zonas circulares de los extremos sin cubrir. Seguidamente se colocaron de nuevo las muestras en el horno a la misma temperatura durante 24 horas y se enfriaron en el desecador para luego obtener el primer dato que es el peso inicial.

Luego se colocaron las probetas en un recipiente sobre una espuma humedecida con una cantidad de agua conocida e igual para todas las probetas, y se pesaron las muestras utilizando una balanza (LEXUS modelo MIX-H con capacidad de 600 g y precisión de 0,01) a diferentes intervalos de horas, teniendo en cuenta secar las probetas superficialmente antes de pesarlas (ver Figura 32b).

Terminado este ciclo, se sacaron las muestras y se sumergieron en agua por 48 horas para pesarlas al aire y en agua utilizando la balanza eléctrica con marca A & D (ver Figura 32c). Y finalmente las muestras se secaron en el horno a 60°C hasta obtener el peso constante ($\approx 48h$).

Con la realización de este ensayo se obtiene la absorción de agua con la ecuación 7:

$$Abs.A = \frac{(Pf - Pi)}{Ac} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

Abs. A Absorción de agua

Pf Peso final (peso después de cada tiempo determinado)

Pi Peso inicial

Ac Área de contacto con agua

De acuerdo a la gráfica de absorción de agua (Kg/m^2) contra $(tiempo)^{1/2}$ es posible obtener el coeficiente de absorción capilar, K en $Kg/m^2 \cdot s^{1/2}$, que corresponde a la pendiente de la región lineal. Esta relación se ha usado en otras investigaciones y está definida por la siguiente ecuación (29):

$$i = A + S\sqrt{t} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

- A** Constante en el intercepto $t=0$
- i** Volumen acumulado absorbido por unidad de área
- S** Coeficiente de absorción capilar
- t** Tiempo de contacto con agua

Adicionalmente, se puede calcular la porosidad total y la densidad teniendo en cuenta el procedimiento que se lleva a cabo en la última fase del ensayo con las ecuaciones 9 y 10:

$$\% Pt = \frac{(W_{sat} - W_{60^{\circ}C})}{(W_{sat} - W_{sum})} \times 100$$

Ecuación 9

Donde:

- % Pt** Porosidad total
- W_{sat}** Peso al aire (g)
- W_{sum}** Peso en el agua (g)
- $W_{60^{\circ}C}$** Peso después de secar la probeta (g)

$$\rho = \frac{W_{60^{\circ}C}}{V}$$

Ecuación 10

Donde:

- ρ** Densidad (g/cm^3)
- $W_{60^{\circ}C}$** Peso después de secar la probeta (g)
- Vol** Volumen del cilindro (cm^3)



a)



b)



c)



d)

Figura 32 Equipos para ensayo de absorción capilar, a) Desecador, b) Balanza (LEXUS, 600 g), c) Montaje de probetas para succión capilar, d) Balanza eléctrica

3.2.2.5 Resistencia al Ataque de Sulfatos.

La resistencia al ataque de los sulfatos se realizó bajo la norma *ASTM C1012* (Equivalente a la *NTC 3330*). Este ensayo permite identificar la expansión de morteros expuestos a una solución de sulfato de sodio al 5%. El procedimiento consiste en medir longitudinalmente, prismas de mortero de 25 mm x 25 mm x 285 mm (ver Figura 33a) para identificar la expansión de acuerdo con la ecuación 5 para lo cual se utilizó un comparador longitudinal digital marca ELE Soiltest (ver Figura 33b).

$$\Delta L = \frac{L_x - L_i}{L_g} \times 100$$

Ecuación 11

Donde:

- ΔL Cambio longitudinal a la edad X, en %.
- L_x Lectura del comparador de la probeta a la edad x, menos la lectura de la barra de referencia.
- L_i Lectura inicial (antes de someter a sulfatos) del comparador de la probeta a la edad x, menos la lectura de la barra de referencia.
- L_g Longitud nominal entre los topes de medida (250 mm).

Para la realización de este ensayo se deben fabricar cubos de mortero según la norma *ASTM C109* que se someterán a condiciones estándar de curado con los prismas, y se fallarán a diferentes edades hasta obtener una resistencia a la compresión de mínimo 21Mpa, lo que nos indica la edad a la cual se pueden sumergir los prismas en la solución de sulfatos. Sin embargo, la edad de inmersión de los morteros se realizó a 28 días para garantizar que todos los morteros tuvieran el mismo tiempo disponible para desarrollar resistencias y el mismo tiempo de inmersión en la solución de sulfatos. Según la norma, el pH de la solución se debe mantener entre 6-8 por lo cual se ajustó semanalmente con una solución de ácido sulfúrico al 5%.



a)



b).

Figura 33 Equipos de ensayo de resistencia a sulfatos, a) Moldes de 25 mm x 25 mm x 285 mm, b) Comparador de longitud

3.2.3 ENSAYOS EN HORMIGONES.

3.2.3.1 Trabajabilidad: Método del cono de Abrams.

La manejabilidad, conocida también como trabajabilidad, se considera como aquella propiedad del hormigón mediante la cual se determina su capacidad para ser colocado y consolidado apropiadamente y para ser terminado sin segregación dañina alguna.

No se conoce ningún método directo para medir la manejabilidad de una mezcla de hormigón, sin embargo hay algunos ensayos que permiten correlacionar esta propiedad del hormigón, en estado plástico, con alguna característica. El ensayo más ampliamente usado en el mundo, por su simplicidad y rapidez, es el de asentamiento, el cual mide la consistencia o fluidez de una mezcla fresca de hormigón. (30)

La determinación del asentamiento del concreto fresco se realizó de acuerdo con la norma ASTM C143 (equivalente a la NTC-396) (31).

Las herramientas y equipo que debe usarse para este ensayo de acuerdo con la norma se observa en la Figura 34.

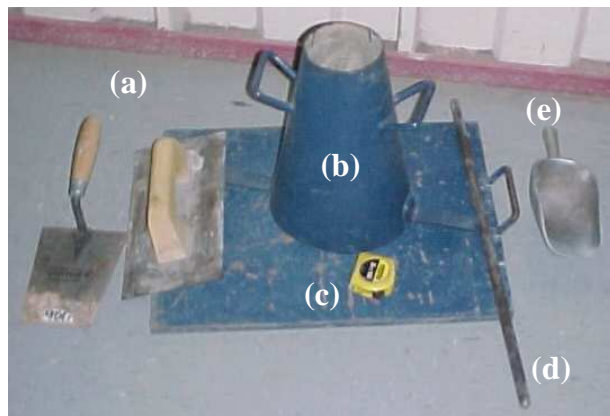


Figura 34 Equipo para determinar la trabajabilidad del hormigón: a) Instrumento para enrasar, b) Cono de Abrams, c) Flexómetro, d) Varilla compactadora y e) Pala para adición de mezcla.

El procedimiento para llevar a cabo el ensayo es el siguiente (Ver Figura 35):

- Se humedece el molde y se coloca sobre una superficie horizontal rígida, plana, húmeda y no absorbente;
- Se sujeta firmemente con los pies y se llena con la muestra de hormigón en tres capas, cada una de ellas de 1/3 del volumen del molde aproximadamente. Cada capa debe compactarse con 25 golpes de la varilla, distribuidos uniformemente sobre su sección transversal. Ver Figura 35 (a), (b), (c);
- Se enrasa la superficie del molde. Ver Figura 35 (d);
- Luego se levanta el molde a una distancia de 300 mm durante 5 segundos mediante un movimiento uniforme hacia arriba sin producir movimiento lateral o de torsión al concreto, la operación completa desde que se comienza a llenar el molde hasta que se retira debe efectuarse sin interrupción durante el tiempo máximo de 2 minutos y 30 segundos. Ver Figura 35 (e);
- Inmediatamente se mide el asentamiento determinando la diferencia vertical entre la parte superior del molde y el centro desplazado de la superficie superior de la muestra, si ocurre un derrumbamiento pronunciado del concreto hacia un lado de la muestra debe rechazarse y efectuarse de nuevo. Ver Figura 35 (f).

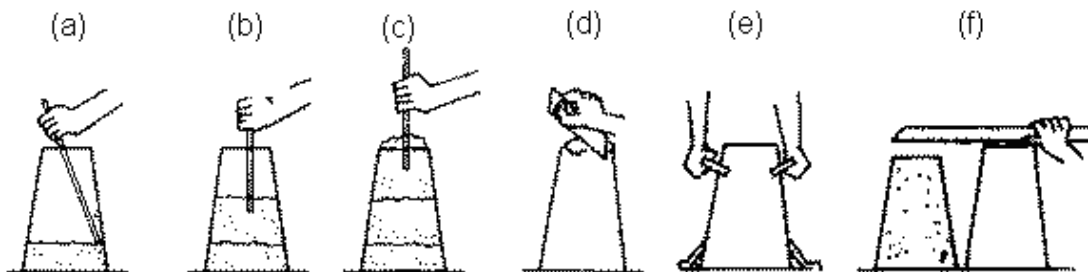


Figura 35 Esquema del procedimiento del ensayo de asentamiento con el cono de Abrams.

3.2.3.2 Contenido de aire ocluido. Método de Presión

Con este método es posible determinar el contenido del aire en el hormigón fresco mediante la observación del cambio en el volumen debido al cambio de presión.

El contenido de aire del concreto fresco se realizó de acuerdo con la norma *ASTM C231*, (equivalente a la NTC 1032) (32). La norma propone el uso de alguno de los dos tipos de

aerómetros, tipo A o de tipo B, los cuales tienen diseños distintos pero ambos emplean el principio de la ley de Boyle.

Para el ensayo se usó un medidor de aire o aerómetro Tipo B (marca Humboldt H-2783), el cual se presenta en la Figura 36, así como los elementos que se describen a continuación:

- Recipiente de Medida;
- Cubierta;
- Vaso de Calibración;
- Resorte en espiral u otro mecanismo para sostener el vaso de calibración en su lugar;
- Tubo rociador;
- Palustre;
- Varilla apisonadora;
- Maceta o mazo;
- Barra de enrase;
- Platina (lámina de enrase);
- Embudo;
- Medidor de agua;
- Vibrador;
- Tamices.



Figura 36 Aerómetro de presión Tipo B (33)

El procedimiento para llevar a cabo el ensayo fue el siguiente de acuerdo con la norma (32):

- Preparación de la muestra de hormigón para el ensayo;
- Se obtiene una muestra de hormigón fresco, de acuerdo con los procedimientos aplicables de la NTC 454 (34); si el hormigón tiene partículas de agregado grueso que pueda retenerse en el tamiz de 50 mm se tamiza en húmedo una cantidad suficiente de la muestra sobre el tamiz 37,5 mm de acuerdo con la NTC 454, para producir una cantidad mayor que la necesaria, y llenar el recipiente de medida del tamaño seleccionado para uso. El tamizado húmedo se realiza alterando lo menos posible el mortero;
- Colocación y compactación de la muestra;
- Se humedece el interior del recipiente de medida y se coloca sobre una superficie plana, nivelada y plana. Se coloca una muestra representativa de hormigón en el recipiente de medida en capas iguales, se compacta cada capa y se enrasa.

Previo a la medición el equipo se debe preparar de la siguiente forma:

- Se limpian completamente los flanches o bordes del recipiente y de la cubierta ensamblada, de tal forma que cuando la tapa se ajuste en su lugar, se obtenga un sello hermético;
- Se ensambla el aparato, se cierra la válvula de aire entre la cámara de aire y el recipiente de medida y se abren los dos grifos de la cubierta. Usando una pera de caucho, se inyecta agua por un grifo hasta que esta salga por el otro grifo. El medidor de aire se somete a vibración suave, hasta que todo el aire sea expelido por este mismo grifo.

La medida de la cantidad de aire ocluido se hace de la siguiente forma:

- Se cierra la válvula de purga de aire en la cámara de aire y se bombea aire dentro de esta cámara, hasta que la manecilla del manómetro este en la línea de presión inicial;
- Se dejan pasar algunos segundos para que el aire comprimido se enfríe a la temperatura normal. La manecilla del manómetro se estabiliza en la línea de presión inicial bombeando o liberando aire, como sea necesario, golpeando suavemente el manómetro con la mano;
- Se cierran ambos grifos en los huecos de la cubierta;
- Se abre la válvula de aire entre la cámara de aire y el recipiente de medida, y se golpean vigorosamente los lados del recipiente de medida con el mazo;
- Se golpea suavemente el manómetro, con la mano para estabilizar la manecilla, el porcentaje de aire se lee en la carátula del manómetro. Si se cierra la válvula

principal de aire antes de liberar la presión tanto del contenedor como de la cámara de aire, podrá penetrar agua a la cámara de aire;

- En el caso de que penetre agua a la cámara de aire se debe expulsar a través de la válvula de purga, haciendo que la bomba realice varios ciclos que le permitan retirar las últimas trazas de agua. Se libera la presión abriendo ambos grifos antes de retirar la cubierta.

El resultado lo da directamente el equipo en porcentaje de aire con respecto al volumen de la muestra.

3.2.3.3 Resistencia mecánica a la compresión

La elaboración y curado de especímenes de concreto para los ensayos de laboratorio se realizaron de acuerdo con la norma *ASTM C231*, (equivalente a la NTC 1377) (35), el ensayo de la resistencia a la compresión de los cilindros se realizó de acuerdo con la norma *ASTM C39*, (equivalente a la NTC 673) (36) y el refrentado de las muestras de acuerdo con la norma *ASTM C617* (equivalente a la NTC 504) (37).

A continuación se describe las características principales del ensayo.

Los equipos y materiales usados para el ensayo son los siguientes y pueden observarse algunos de ellos en la Figura 37:

- Moldes cilíndricos (15 cm de diámetro por 30 cm de altura).
- Varilla de compactación.
- Mazo.
- Mesa de vibración.
- Balanza eléctrica de precisión (capacidad 200 kg).
- Mezcladora mecánica.
- Prensa hidráulica (Marca Soiltest Inc. Modelo CT-711, Capacidad 200.000 lbf).
- Nivel de mano.
- Vidrio.
- Yeso para refrentado.



a)



b)



c)



d)

Figura 37 Equipos para el ensayo de resistencia a la compresión de hormigón, a) Mezcladora mecánica, b) Mesa vibratoria y cilindros, c) Prensa hidráulica y d) Nivel y yeso para refrentado

El procedimiento para el ensayo se describe a continuación:

- Preparación de materiales: Se seleccionan los materiales y se pesan en la balanza eléctrica según su dosificación.
- Mezclado: se realiza el proceso de amasado en la mezcladora mecánica de la siguiente manera:
 - Humectación de la tolva.
 - Adición de la totalidad de los áridos y la mitad del agua de amasado.
 - Amasado durante 2 minutos.
 - Reposo por 2 minutos.
 - Adición del cemento.
 - Amasado por 30 segundos
 - Adición del agua restante en los siguientes 30 segundos.
 - Amasado durante 2 minutos.
 - Reposo por 5 minutos para la determinación de la consistencia mediante el cono de Abrams.
- Elaboración de cilindros:

Para cada ensayo se elaboraron seis probetas para ser falladas a los 7, 14 y 28 días de curado y se compactaron en la mesa vibratoria durante 30 segundos para la primera capa y por 15 segundos en la segunda capa para llenar el molde.

- Curado de las probetas:

Pasadas al menos 20 horas después del vaciado, se retiran los cilindros de hormigón del molde y se sumergen en el tanque de curado una vez identificados apropiadamente.

- Refrentado:

Cuando las muestras finalizan su proceso de curado, se usa yeso de alta resistencia para dejar las dos caras de la muestra paralelas, para garantizar los esfuerzos axiales del fallado. El yeso se vacía en estado líquido sobre una de las superficies y se usa un nivel para terminar el proceso.

- Ensayo de compresión:

Se debe garantizar que los cilindros se encuentren húmedos antes y durante el ensayo; también para las muestras en los diferentes días de curado, se debe tener en cuenta la tolerancia permisible de tiempos definidos en la norma para la aplicación de la carga axial en la prensa. Una vez aplicada la carga continua y sin impactos al espécimen, se

registra la carga máxima para calcular la resistencia a la compresión, de acuerdo con la ecuación:

$$R_c = \frac{F_c}{A} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

R_c es la resistencia a compresión en kgf/cm²;

F_c es la máxima carga en la rotura en kgf;

A es el área de la sección transversal de la probeta en cm².

3.2.3.4 Estructura de poros.

Para la caracterización del sistema de poros se usó el el procedimiento de la norma española UNE-EN 480-11 (38). Este método determina la estructura de los huecos de aire en una muestra de hormigón endurecido que contenga aire ocluido. Esta estructura de los huecos se define por medio de los siguientes parámetros: contenido total de aire, superficie específica de los huecos de aire, factor de espaciado y distribución dimensional de los huecos de aire.

Para esta investigación se usó la norma europea mencionada ya que con respecto a otros procedimientos ampliamente usados, proporciona mayor información sobre la estructura de poros en algunos aspectos (ver Tabla 10).

A continuación se describe el procedimiento utilizado en la investigación bajo la norma europea.

Las probetas destinadas a este análisis se cortan perpendicularmente a la cara superior de las muestras de hormigón endurecido con aire ocluido. Las probetas se pulen con abrasivos con el fin de obtener una superficie plana y lisa de la calidad necesaria para el examen microscópico (ver Figura 38a).

Tabla 10 Comparación entre la norma EN480-11 y ASTM C457 (39)

Parámetro	EN 480-11	ASTM C457
Método	Método de líneas transversales	A: Método de líneas transversales B: Método de conteo de puntos modificado
Área (tamaño máximo de agregado 31,5 ó 37,5 mm respectivamente)	150 mm ²	155 mm ²
Número de especímenes	2	≥1
Longitud de la línea transversal (tamaño máximo de agregado 31,5 ó 37,5 mm respectivamente)	≥2400 mm	≥ 2540mm
Magnificación del microscopio	100x±10x	50x hasta 125x
Distribución del tamaño de poros	Si	No
Contenido de microaire	Si	No

La estructura de los huecos se examina por barrido a través de una serie de líneas transversales paralelas a la cara superior original. Se registra el número de huecos de aire intersectados por cada línea transversal, así como las longitudes de las cuerdas individuales del barrido a través de los huecos de aire (ver Figura 38b).

Un análisis matemático de los valores obtenidos permite calcular los parámetros que sirven para determinar la estructura de los huecos de aire.

- **Obtención de las probetas**

Las probetas utilizadas para los ensayos, se obtuvieron de los cilindros de hormigón elaborados después de un curado de 28 días. Se cortó de la zona central de la muestra, una probeta de 100 mm de anchura, 100 mm de altura y 20 mm de espesor, mediante el uso de una cortadora de disco (ver Figura 39).

La superficie para el análisis se debe pulir con agua, hasta que sea totalmente plana. Una vez pulida se debe limpiar para eliminar los residuos. La finalidad es obtener una superficie apropiada para el examen microscópico de la estructura de los huecos de aire en el hormigón. La superficie, una vez seca, debería ser mate y no presentar ningún relieve visible entre la pasta de cemento y la superficie de los áridos. Las aristas de los huecos deberían ser vivas y no quebradas ni redondeadas.

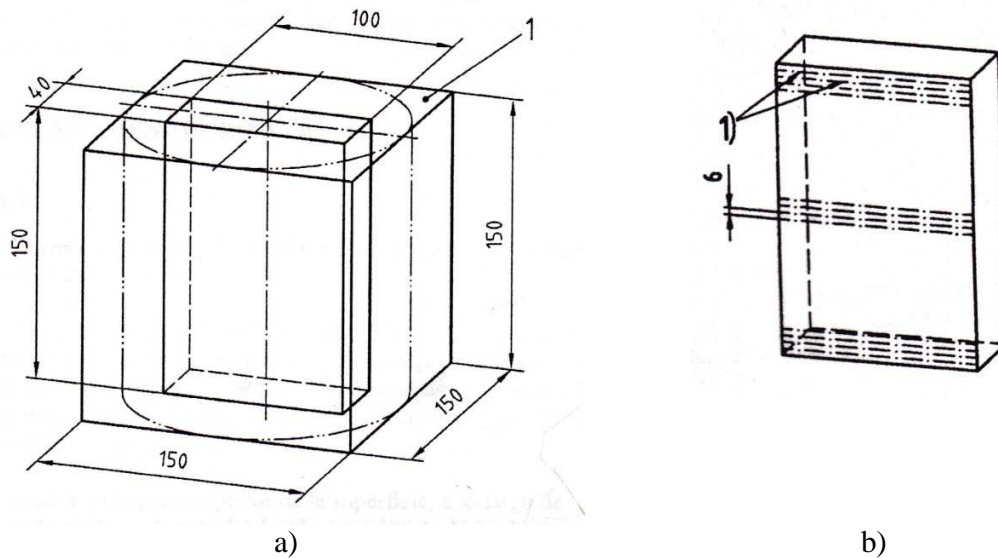


Figura 38 Probetas para la lectura de poros en hormigón endurecido, a) Corte de probeta de 150 mm x 100 mm x 40 mm, b) Líneas de barrido en la superficie para ensayo (38)



Figura 39 Cortadora de disco para obtención de probetas de lectura de poros

- **Preparación de la muestra:**

Es necesario realizar un tratamiento especial a la cara de la probeta para ensayo con el fin de producir un mejor contraste entre los poros de aire y la pasta de cemento. Este tratamiento se llevó a cabo de acuerdo con lo propuesto en las norma y en otras investigaciones similares.

El procedimiento seguido para la preparación de las muestras es el siguiente (38):

- Pulido inicial con una serie de papeles abrasivos.
- Pulido con abrasivos finos (óxido de aluminio, carburo de silicio)
- Aplicar una capa de tinta en la superficie de la probeta con un tampón simple o con un rodillo teniendo cuidado de que la tinta no penetre en los huecos de aire. Se usó una tinta negra base de aceite de alta viscosidad usada para litografía offset (ver Figura 40b).
- Secar la probeta en una estufa a 50°C durante cuatro horas.
- Recubrir la superficie para ensayo con una pasta de cinc y refrigerar antes de eliminar el exceso de pasta (ver Figura 40d).
- Recubrir la superficie con una capa delgada de yeso teniendo la precaución de que penetre en los huecos de aire llenos de polvo de cinc y retirar el exceso de pasta de yeso con ayuda de una lima.



a) Tinta usada para la tinción



b) Aplicación de tinta a la muestra de hormigón



c) Preparación de pasta de cinc



d) Muestra refrigerada recubierta con pasta de cinc

Figura 40 Aplicación de tinta y pasta de cinc para preparación de muestras de hormigón

- **Examen microscópico:**

Se coloca cada probeta en la mesa de recuento de tal manera que las líneas transversales, que se deben observar durante el ensayo, sean paralelas a la cara superior de la probeta.

Para cada probeta se requiere una distancia mínima de recorrido de 1200 mm, lo que da un total de 2400 mm por ensayo. Se necesitan un número mínimo de recorridos transversales para obtener la distancia total requerida. La disposición de las líneas transversales para recorrer es la siguiente (ver Figura 38b):

- Cuatro líneas transversales en la superior de la superficie, a los largo de toda la anchura. La línea más alta se deberá situar, aproximadamente, a 6 mm del borde superior de la probeta, y las líneas siguientes a una distancia de 6 mm unas de otras;
- Una segunda serie de cuatro líneas en la parte inferior de la superficie. La línea más baja se debería situar, aproximadamente, a 6 mm del borde inferior de la probeta y las siguientes a unos 6 mm, unas de otras;
- Una última serie de líneas de barrido se sitúan en la parte central de la superficie, espaciadas unas de otras, aproximadamente, 6 mm con el fin de obtener la distancia de barrido total requerida. En esta zona se necesitan cuatro líneas como mínimo, pudiendo ser más para proporcionar las longitudes de barrido mínimas requeridas si la superficie presenta zonas dañadas.

Se debe examinar la cara para ensayo con un microscopio utilizando un aumento de $(100 \pm 10) \times$; este aumento no se debe modificar durante el ensayo. Se examina la muestra a lo largo de las líneas de barrido.

Para facilitar el registro de los valores se usó una cámara de video conectada al microscopio. Las características del microscopio y la cámara de video usados, se presentan en la Tabla 11 y la Tabla 12 respectivamente.

Tabla 11 Especificaciones técnicas del microscopio utilizado para la captura de imágenes

Marca	Nikon, Industrial Microscope
Modelo	ECLIPSE LV100D
Sistema óptico	CF160 (infinity-corrected CF optical system) Microscopio binocular, lente ocular 10X
Lente objetivo usado	5X

Tabla 12 Especificaciones cámara de video utilizada para la captura de imágenes

Marca	Nikon
Modelo	DS Camera Control Unit DS-L2
Display	LCD display: 8.4 pulg TFT liquid crystal display, 1024x768 XGA Formato de salida externo: Digital DVI output (DVI standards 1.0) or analog RGB output (0.7 Vp-p) (75 Ω), SXGA/XGA seleccionable

Los equipos mencionados pueden observarse en la Figura 41.



Figura 41 Microscopio y cámara usados en examen microscópico

Una vez ubicada la muestra sobre la platina del microscopio, se verifican las condiciones de iluminación y posición de la muestra. Para seleccionar la porción de la imagen a analizar, se emplean los tornillos de desplazamiento horizontal y vertical de la platina del microscopio.

Posteriormente se realizó el análisis de la imagen usando las herramientas de medición de longitud del software NIS Elements D, por medio del cual se realizó el registro de los valores que se menciona a continuación:

- Distancia recorrida en las fases sólidas de la superficie de la probeta, T_s ;
- Distancia recorrida a través de los huecos de aire, T_a ;
- La suma de los dos valores de la distancia recorrida, T_{tot} ;

La configuración del sistema usado para la captura y examen microscópico se ilustra en la Figura 42.

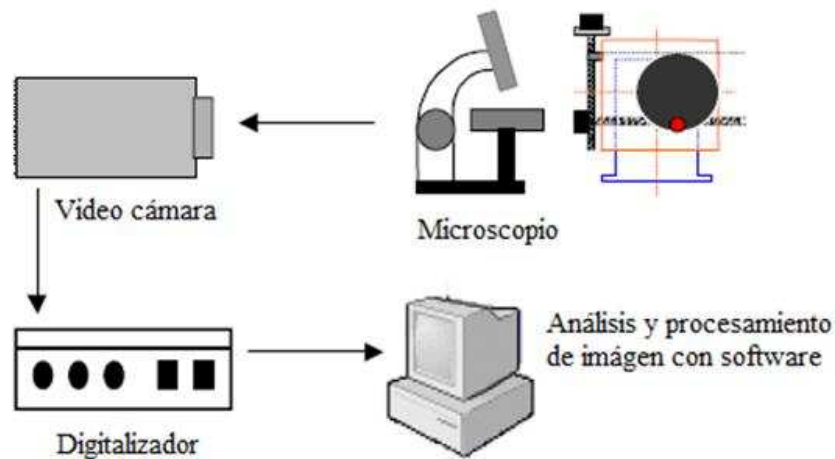


Figura 42 Configuración del sistema para el análisis de la estructura de poros (6)

En la Figura 43 se puede observar el registro de T_a en una de las líneas transversales marcadas en una de las probetas mediante el aplicativo. Las mediciones se realizaron para cada probeta en las líneas transversales marcadas y fueron exportadas a Excel por medio del software.

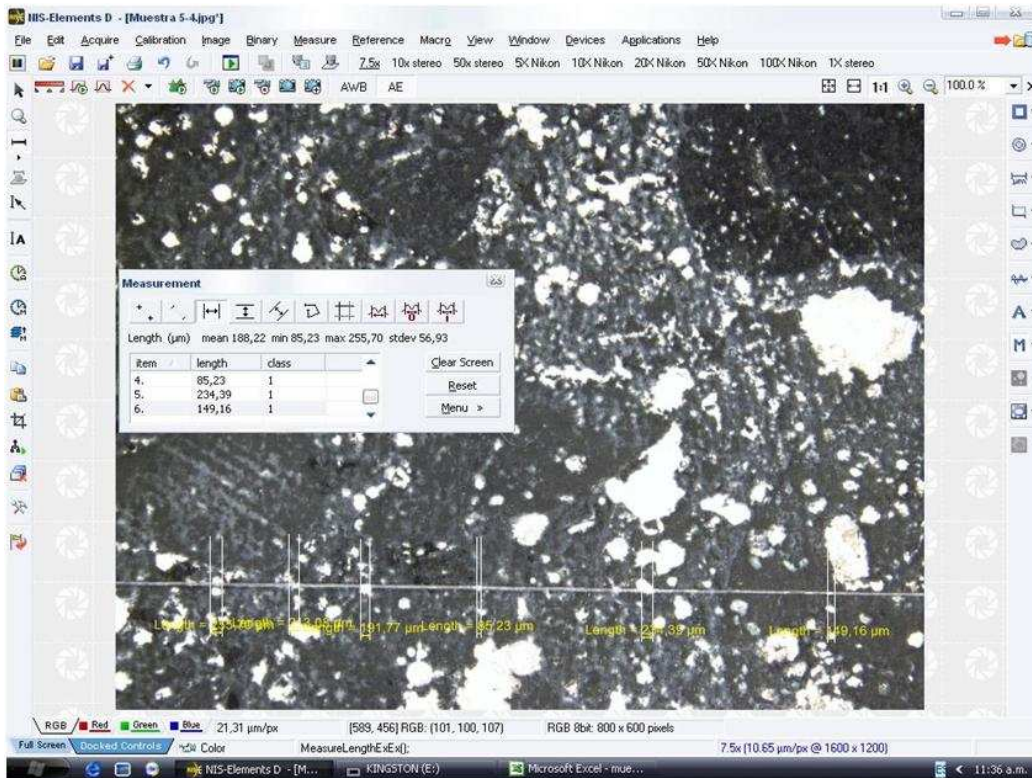


Figura 43 Medición de la distancia recorrida a través de los huecos de aire en el examen microscópico de las probetas de concreto endurecido

Estos valores se almacenaron en medio magnético, para distribuir todas las cuerdas en 28 clases de diferentes longitudes. La distribución de los correspondientes huecos de aire se puede calcular a partir de esta clasificación. El recuento debe tener en consideración todas las cuerdas de los huecos de aire visibles en la pasta de cemento endurecido cuya longitud esté comprendida entre 0 μm y 4000 μm ; solamente se exceptúan las fisuras obvias (ver Tabla 14).

Si, a pesar de un pulido cuidadoso, los bordes de los huecos de aire están dañados y éste daño se encuentra en el trayecto de una línea transversal, se debe utilizar la sección circular completa como base para determinar la longitud de la cuerda (ver Figura 44).

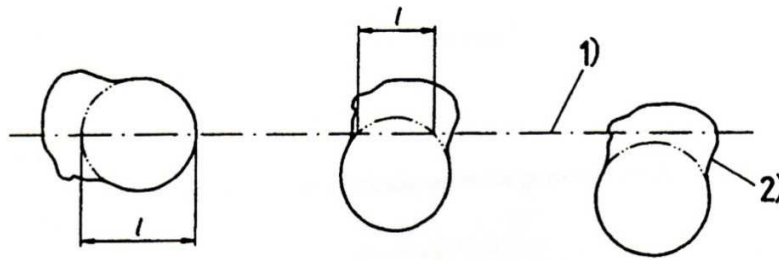


Figura 44 Estimación de una cuerda l para bordes rotos de los huecos de aire, 1) Línea transversal ficticia, 2) Ninguna cuerda interceptada (l)

- **Cálculo de parámetros de la estructura de poros:**

Para los fines de cálculo, los totales de cada probeta para el mismo hormigón sometido a ensayo se deben sumar:

- Contenido en pasta de cemento en volumen, calculado a partir de las proporciones de la mezcla, P ;
- Longitud total de barrido correspondiente a las fases sólidas, T_s ;
- Longitud total de barrido correspondiente a los huecos de aire, T_a ;
- Número de cuerdas individuales que atraviesan huecos de aire, contenidos en cada clase dimensional, C_i ;

Con estos datos es posible calcular los parámetros que se detallan en la Tabla 13.

- **Cálculo de la distribución de poros:**

La distribución de los huecos de aire se calcula a partir de la distribución de las cuerdas medidas durante el barrido transversal. El cálculo se basa en el modelo que supone la existencia de un solo conjunto de diámetros nominales de huecos de aire. Los diámetros nominales corresponden al valor máximo de la longitud de la cuerda en cada una de las clases.

Los datos necesarios para este cálculo son la longitud total barrida, T_{tot} , así como la distribución de la longitud de las cuerdas. Las cuerdas medidas, con una aproximación de 5 μm , se distribuyen según su longitud, en un determinado número de clases. Esta distribución es calculada en la norma usando un modelo de cálculo resumido en la Tabla 14

que constituye un medio estadístico de valorar el número total de huecos de aire a partir de los huecos interceptados.

Tabla 13 Cálculo de parámetros de la estructura de poros a partir del examen microscópico

Parámetro	Ecuación	Observaciones
Longitud total barrida (T_{tot} , en mm)	$T_{tot} = T_s + T_a$	Suma correspondiente a las fases sólidas y a los huecos de aire y debe ser como mínimo 2400 mm
Contenido total de aire (A , en %)	$A = \frac{T_a \times 100}{T_{tot}}$	Proporción de la longitud total recorrida que corresponde a los huecos de aire.
Número total de cuerdas medidas (N)	$N = \sum C_i$	Es la suma del número de cuerdas en cada una de las cuerdas dimensionales.
Superficie específica (α , en mm^{-1})	$\alpha = \frac{4 \times N}{T_a}$	
Relación pasta/aire (R)	$R = \frac{P}{A}$	Relación entre el volumen de la pasta, P , determinado según las proporciones de la mezcla, y el contenido de aire.
Factor de espaciado (L , en mm)	Si $R > 4,342$ entonces: $L = \frac{3 \left[1,4(1 + R)^{1/3} - 1 \right]}{\alpha}$ Si $R \leq 4,342$ entonces: $L = \frac{P \times T_{tot}}{400 \times N}$	

Tabla 14 Modelo de cálculo para la determinación de la distribución de los huecos de aire (38)

Longitud total barrida, T_{tot}										
Columna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Materia	Clase	Límite de las clases	Número de cuerdas registradas en una clase	Frecuencia de la cuerda	Fracción encontrada	Total posible	Huecos en la clase	Volumen de los huecos	Contenido de aire	Contenido en aire acumulado
Fuente		Los valores de las columnas 1, 2, 5 y 8 no varían de un ensayo a otro ¹⁾	Medida C_i	Columna 3 dividida por T_{tot}	Los valores de las columnas 1, 2, 5 y 8 no varían de un ensayo a otro ¹⁾	Columna 4 dividida por la columna 5	Columna 6 menos el valor siguiente de la columna 6	Los valores de las columnas 1, 2, 5 y 8 no varían de un ensayo a otro ¹⁾	Columna 7 multiplicada por la columna 8 multiplicada por 100	Total acumulado de la columna 9
Unidades		μm		mm^{-1}	mm^2	mm^{-3}	mm^3	mm^3	%	%
	1	0 a 10			0,0001178			$5,24 \times 10^7$		
	2	15 a 20			0,0002749			$4,19 \times 10^4$		
	3	25 a 30			0,0004320			$1,41 \times 10^3$		
	4	35 a 40			0,0005890			$3,35 \times 10^3$		
	5	45 a 50			0,0007461			$6,54 \times 10^3$		
	6	55 a 60			0,0009032			$1,13 \times 10^4$		
	7	65 a 80			0,0022780			$2,68 \times 10^4$		
	8	85 a 100			0,0025060			$5,24 \times 10^4$		
	9	105 a 120			0,0035340			$9,05 \times 10^3$		
	10	125 a 140			0,0041630			$1,44 \times 10^3$		
	11	145 a 160			0,0047910			$2,14 \times 10^3$		
	12	165 a 180			0,0054190			$3,05 \times 10^3$		
	13	185 a 200			0,0060475			$4,19 \times 10^3$		
	14	205 a 220			0,0066760			$5,58 \times 10^3$		
	15	225 a 240			0,0073040			$7,24 \times 10^3$		
	16	245 a 260			0,0079330			$9,20 \times 10^3$		
	17	265 a 280			0,0085610			$1,15 \times 10^3$		
	18	285 a 300			0,0091890			$1,41 \times 10^3$		
	19	305 a 350			0,0257200			$2,24 \times 10^3$		
	20	355 a 400			0,0296500			$3,35 \times 10^3$		
	21	405 a 450			0,0335800			$4,77 \times 10^3$		
	22	455 a 500			0,0375000			$6,54 \times 10^3$		
	23	505 a 1 000			0,5910000			$5,24 \times 10^4$		
	24	1 005 a 1 500			0,9837000			1,77		
	25	1 505 a 2 000			1,3760000			4,19		
	26	2 005 a 2 500			1,7690000			8,18		
	27	2 505 a 3 000			2,1620000			$1,41 \times 10^1$		
	28	3 005 a 4 000			5,5020000			$3,35 \times 10^1$		

1) Los valores de las columnas 1, 2, 5 y 8 no varían de un ensayo a otro..

El contenido de las columnas del modelo de cálculo se resume a continuación (38):

- Columna 1: Número de designación de la clase
- Columna 2: Límites inferiores y superiores de las longitudes para cada clase. Unidades expresadas en micrómetros, μm .
- Columna 3: Número de cuerdas observadas en cada clase durante el examen microscópico.
- Columna 4: Número de cuerdas por milímetro de línea transversal barrida.
- Columna 5: Fracción de huecos efectivamente contados. Este factor se expresa en milímetros cuadrados, mm^2 .
- Columna 6: Número total de huecos por milímetro cúbico de hormigón que contiene una cuerda de una clase determinada.
- Columna 7: Número total de huecos de un diámetro igual al límite superior de la clase, por milímetro cúbico de hormigón.
- Columna 8: Volumen atribuido a cada hueco de una clase, en milímetros cúbicos, mm^3 .
- Columna 9: Volumen total atribuido a todos los huecos de una clase, expresado en tanto por ciento del volumen del hormigón.
- Columna 10: Contenido de aire total acumulado que corresponde a los huecos del conjunto de clases de rango inferior o igual al rango considerado, expresado en tanto por ciento del volumen del hormigón.

Para obtener el posible número total de huecos de aire presentes en un milímetro cúbico de hormigón, se dividió el valor correspondiente a la frecuencia de las cuerdas medidas en el microscopio por cada clase, sobre un valor constante que se obtiene por medio de la ecuación siguiente:

$$\text{Proporción de huecos de aire encontrados (mm}^2\text{)} = \frac{\pi \times (5 + l_{\text{máx}} - l_{\text{mín}}) \times (l_{\text{máx}} + l_{\text{mín}})}{4 \times 10^6}$$

Donde $l_{\text{máx}}$ y $l_{\text{mín}}$ son la longitud máxima y mínima de la cuerda de una clase dada.

El factor 5 del numerador se debe al hecho de que todas las longitudes de las cuerdas se redondean, aproximadamente a 5 μm . La ecuación se base en una valoración estadística de la población de huecos de aire.

Éste cálculo proporciona el valor de la columna 5, los cuales no varían de un ensayo a otro según lo establecido en la norma.

La distribución de huecos de aire se puede representar en función de su diámetro nominal utilizando los valores del diámetro superior de cada clase de la columna 2 y el valor de la columna 10. Se puede representar como un tanto por ciento acumulado, como el obtenido

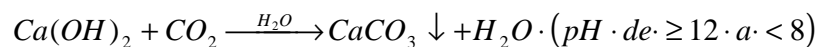
en la columna 10, o como una fracción acumulada del contenido total de aire, dividiendo cada valor de la columna 10 por el contenido total de aire calculado.

3.2.3.5 Carbonatación

Para determinar la carbonatación no se encuentra algún procedimiento establecido bajo alguna norma técnica, pero varios investigadores emplean el indicador de fenolftaleína para determinar la profundidad de carbonatación una vez se exponen las muestras en cámaras de carbonatación, acelerando el proceso, o al ambiente por prolongados períodos de tiempo. Este procedimiento es el empleado en otros estudios en morteros y hormigones.

Dado que la carbonatación produce un cambio en el pH, el ensayo se determina en el hormigón endurecido mediante el uso de un indicador ácido-base que es un compuesto que cambia de color en la solución a medida que cambia el pH.

El indicador usado es la fenolftaleína ya que el rango de pH del cambio de color (de 8,3 a 10,0), está de acuerdo con la reacción del proceso de carbonatación en la fase acuosa:



La fenolftaleína es un indicador monocromático cuyo color ácido es incoloro y su color alcalino es fucsia o violeta (40). Esta solución se aplica al hormigón, si el color de la zona ensayada cambia a violeta es índice de la existencia del hidróxido de calcio y por lo tanto de no carbonatación, pero si el color del hormigón no se altera esto representa carbonatación (10).

El ensayo consiste en aplicar fenolftaleína en las muestras después del curado y seguidamente se mide la profundidad de carbonatación (en milímetros) con un pie de rey para determinar la distancia que existe entre la arista del cilindro y el límite de la coloración. La profundidad de carbonatación (X_p) es el promedio de varias mediciones realizadas a la probeta desde los bordes (ver Figura 45)

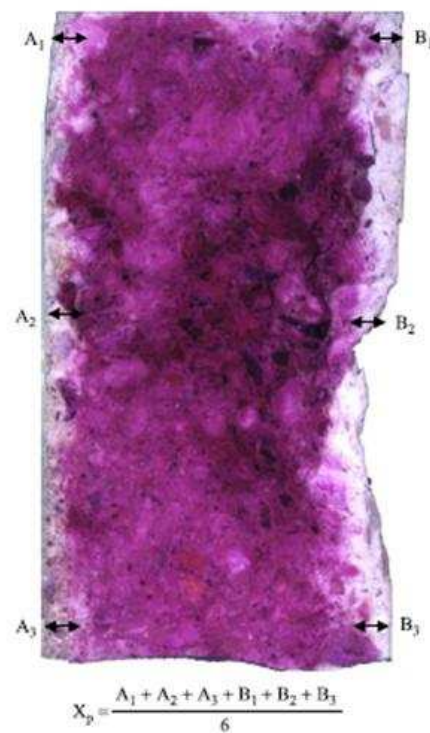


Figura 45 Medición de la profundidad de carbonatación en la sección transversal de muestras de hormigón (41)

Para el presente trabajo se expusieron probetas cilíndricas de hormigón (de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura, de 14 días de curado) al ambiente durante aproximadamente un año, bajo condiciones promedio de 23°C, humedad relativa del 70% y concentración de CO₂ de 0,04%. Se aplicó fenolftaleína y se midió la profundidad de carbonatación promedio.