



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

**EVALUACION DE LAS PROPIEDADES DE PERMEABILIDAD AL  
AIRE Y DURABILIDAD DE CONCRETOS ADICIONADOS CON  
CALIZA Y ARCILLAS CALCINADAS**

Luis Eduardo Peña Cruz

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola  
Bogotá D.C., Colombia  
2023



# **Evaluación de las propiedades de permeabilidad al aire y durabilidad de concretos adicionados con caliza y arcillas calcinadas**

**Luis Eduardo Peña Cruz**

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Ingeniería - Estructuras**

Director (a):  
Ingeniero Juan Manuel Lizarazo Marriaga

Línea de Investigación:  
Materiales para construcción  
Grupo de Investigación:  
GIES - Grupo de investigación en análisis, diseño y materiales

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola  
Bogotá, Colombia  
2023



## Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



Luis Eduardo Peña Cruz

1 de marzo de 2023



## **Agradecimientos**

A la Universidad Nacional por la oportunidad de finalizar esta meta que tenía pendiente.

A mi director de tesis, el Ingeniero Juan Manuel Lizarazo Marriaga por su permanente apoyo, disposición y colaboración.

Al Ingeniero Luis Felipe Salazar, estudiante de maestría integrante del grupo de investigación en análisis y diseño, quien diseñó las mezclas base de esta investigación.

Al Ingeniero Darío Moreno del laboratorio de modelos por su colaboración en los ensayos de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad; al Ingeniero Jorge Olarte del laboratorio de cementos por su colaboración el aserrado de la totalidad de las muestras, y al Técnico Edgardo Muñoz del laboratorio de tecnología del concreto por su colaboración en la preparación de las mezclas y rotura de probetas en los ensayos de permeabilidad al agua y migración y difusión de cloruros.





## Resumen

### Evaluación de las propiedades de permeabilidad al aire y durabilidad de concretos adicionados con caliza y arcilla calcinada

En esta investigación se evaluaron las propiedades de permeabilidad al aire y al agua, la resistencia a la penetración de cloruros, impedancia eléctrica, porosidad, densidad, resistencia a la compresión y módulo de elasticidad de cinco mezclas de concreto adicionadas con arcilla calcinada y caliza en diferentes proporciones (M01) a (M05) y una mezcla de referencia sin ninguna adición (MR). Todas las mezclas fueron diseñadas por el Ingeniero Luis Felipe Salazar (Salazar Mayorga, 2023), integrante del grupo de investigación y análisis dirigido por el Ingeniero Juan Manuel Lizarazo Marriaga, como base para la realización de una serie de investigaciones sobre los cementos adicionados con arcilla calcinada y caliza.

Todas las mezclas tienen la misma relación agua /cementante igual a 0.50 y la arcilla calcinada utilizada es de baja gradación, con un contenido de caolinita igual al 40%. El cemento utilizado como referencia es de marca Alión de altas resistencias tempranas (ART) por ser un cemento con un mínimo de adiciones y muy cercano a lo que se considera un cemento pórtland.

Las probetas fueron curadas y ensayadas a edades superiores a 90 días en el laboratorio de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. El ensayo de Salt Pounding Test - SPT; se realizó según las normas NT-443 para el acondicionamiento de probetas y NT-492 para evaluación de la profundidad de penetración. Las probetas permanecieron sumergidas en solución salina durante 148 días adicionales a los 90 días de curado.

Al analizar los resultados correspondientes a las propiedades mecánicas, se encontró que la resistencia a la compresión en las mezclas adicionadas hasta con un 45% de arcilla calcinada más caliza (M01 a M04) es similar a la de la mezcla de referencia (MR). Para un porcentaje

## X

de sustitución del cemento del 50% (M05) la resistencia a la compresión disminuyó en un 17%. El módulo de elasticidad en las mezclas adicionadas M01 a M04 tiene un valor similar al de la mezcla de referencia MR. Para la mezcla M05 con un 50% de sustitución del cemento, el valor del módulo de elasticidad disminuyó un 15% respecto al de la mezcla de referencia MR.

La densidad de todas las mezclas es muy similar y no se encontró variación apreciable. La porosidad de las mezclas adicionadas fue menor que la de la mezcla de referencia a excepción de la mezcla M01 que presentó un valor ligeramente mayor.

En cuanto a las propiedades relacionadas a la durabilidad se evaluaron la permeabilidad al aire y al agua, la resistencia a difusión y migración de cloruros y la impedancia eléctrica.

La totalidad de las mezclas presentaron baja permeabilidad al aire. Se evidenció que la adición de arcillas calcinadas y caliza, tal como se esperaba, efectivamente disminuye la permeabilidad al aire debido a un refinamiento en la estructura de poros del concreto. El contenido óptimo de adiciones corresponde a la mezcla M02 con un 20% de arcilla calcinada y 10% de caliza.

La permeabilidad al agua de todas las mezclas se evaluó como baja. No se pudo establecer una relación cuantitativa confiable entre las mezclas debido a deficiencias en la calidad de la pintura epóxica utilizada que distorsionó los resultados al permitir que el flujo de agua no fuera unidireccional.

No hay relación cuantitativa alguna entre la permeabilidad al aire y al agua debido esencialmente a la naturaleza y comportamiento de los fluidos.

La resistencia a la penetración de cloruros en todas las muestras adicionadas fue menor que la de la mezcla de referencia. De acuerdo con el ensayo Nordtest Build- 492 (NT Build-492) el porcentaje óptimo de sustitución de cemento es del 60% correspondiente a la mezcla M03. El ensayo de estancamiento de sal SPT dio como resultado un contenido óptimo de adiciones igual al 45% del contenido de Clinker, correspondiente a la mezcla M02, pero con muy poca diferencia con las muestras más adicionadas M03, M04 y M05.

El ensayo de impedancia eléctrica dio como resultado que todas las muestras adicionadas tienen una mayor impedancia que la mezcla de referencia. Esto se debe al incremento de la

alcalinidad de la solución de poros por causa de la arcilla calcinada. El comportamiento de las mezclas es consistente con lo encontrado en los ensayos de migración y difusión de cloruros

Como conclusión de la investigación se encontró que los concretos adicionados con arcillas calcinadas y caliza mejoran las propiedades mecánicas y de durabilidad con porcentajes de sustitución del cemento desde un 40% hasta un 60% (factor Clinker 60% a 40%). El alto nivel de sustitución debe verse con mucho cuidado puesto que al reducir el porcentaje de cemento pòrtland también se reduce la disponibilidad de material carbonatable y la durabilidad se ve comprometida por temas de corrosión.

Palabras clave: permeabilidad, durabilidad, arcilla calcinada, caliza



## Abstract

### Evaluation of air permeability properties and durability of concretes blended with limestone and calcined clay

In this research, the properties of permeability to air and water, resistance to chloride penetration, electrical impedance, porosity, density, compressive strength, and elasticity modulus of five concrete mixtures blended with different proportions of calcined clay and limestone were evaluated (M01) to (M05), and a reference mixture without any addition (MR). Engineer Luis Felipe Salazar designed all the mixtures (Salazar Mayorga, 2023), a member of the research and analysis group led by Engineer Juan Manuel Lizarazo Marriaga, as the basis for carrying out a series of investigations on cements blended with calcined clay and limestone.

All the mixes have the same water/cement ratio equal to 0.50. The calcined clay used is a low-grade clay, with a kaolinite content equal to 40%. The cement used as a reference is Alión brand of high early resistance (ART) because it is a cement with a minimum of additions and close to what is considered a pórtland cement.

The specimens were cured and tested at ages greater than 90 days in the Engineering laboratory of the National University of Colombia, Bogotá headquarters. The Salt Ponding Test - SPT test; It was carried out according to the standards NT-443 for the conditioning of test tubes and NT-492 for evaluation of the depth of penetration. The specimens remained submerged in saline solution for an additional 148 days after 90 days of curing.

When analyzing the results corresponding to the mechanical properties, it was found that the compressive strength in the mixtures blended with up to 45% of calcined clay plus limestone (M01 to M04) is like that of the reference mixture (MR). For a 50% substitution of cement (M05), the compressive strength decreased by 17%.

## XIV

The modulus of elasticity in the added mixtures M01 to M04 has a value like that of the reference mixture MR. For the mix M05 with 50% substitution of the cement, the value of the modulus of elasticity decreased by 15% compared to that of the reference mix MR.

The density of all the mixtures is similar and no appreciable variation was found. The porosity of the blended mixtures was lower than that of the reference mixture MR, except for the M01 mixture, which presented a slightly higher value.

Regarding the properties related to durability, the permeability to air and water, the resistance to diffusion and migration of chlorides and the electrical impedance were evaluated.

All the mixtures had low air permeability. It was evidenced that the addition of calcined clays and limestone, as expected, effectively decrease the air permeability due to a refinement in the pore structure of the concrete. The optimal content of additions corresponds to the mixture M02 with 20% of calcined clay and 10% of limestone.

The water permeability of all blends was evaluated as low. A reliable quantitative relationship between the mixtures could not be established due to deficiencies in the quality of the epoxy paint used, which distorted the results by allowing the water flow to not be unidirectional.

There is no quantitative relationship between air and water permeability due to the nature and behavior of fluids.

The resistance to chloride penetration in all the blended mixtures was lower than that of the reference mixture. According to the Nordtest Build 492 (NT Build-492) test, the optimum cement substitution percentage is 60% (Clinker factor 40%) corresponding to the M03 mixture. The SPT test resulted in an optimal content of additions equal to 45% of the Clinker content, corresponding to the M02 mix, but with very little difference with the most added samples M03, M04 and M05.

The electrical impedance test resulted in all the blended mixtures having a higher electrical impedance than the reference mixture. This is due to the increase in the alkalinity of the pore solution due to the calcined clay. The behavior of the mixtures is consistent with what was found in the chloride migration and diffusion tests.

As a conclusion of the investigation, it is found that the concretes blended with calcined clays and limestone improve their mechanical and durability properties with substitution percentages

of cement from 40% to 60% (Clinker factor 60% to 40%). This elevated level of substitution must be viewed with great care since reducing the percentage of portland cement also reduces the availability of carbonated material and then durability is compromised by corrosion issues.

Keywords: permeability, durability, calcined clay, limestone





## Contenido

1. Capítulo 1.....	9
1.1. Sostenibilidad y materiales de construcción .....	9
1.2. Adiciones minerales .....	11
1.3. Puzolanas .....	12
1.3.1. Las arcillas caolinitas (metacaolín) .....	13
1.4. Propiedades de transporte – durabilidad.....	13
1.5. Cementos adicionados con arcilla calcinada y caliza (LC3) .....	16
1.5.1. Sostenibilidad .....	17
1.5.2. Factores ambientales:.....	18
1.5.3. Economía: .....	18
1.6. Propiedades de los concretos adicionados con arcilla calcinada y caliza relacionadas con la durabilidad.....	18
1.6.1. Porosidad.....	18
1.6.2. Permeabilidad:.....	19
1.6.3. Resistencia a la penetración de cloruros.....	19
1.6.4. Carbonatación.....	19
1.6.5. Reacción álcalis – agregado.....	20
1.7. Propiedades mecánicas de los concretos adicionados con arcilla calcinada y caliza. (LC3).....	20
1.7.1. Resistencia a la compresión.....	20
1.7.2. Módulo de elasticidad .....	21

## XVIII

2. Capítulo 2 .....	23
2.1. Materiales .....	23
2.1.1. Agregados .....	23
<b>Agregado grueso</b> .....	23
(Salazar Mayorga, 2023). .....	24
<b>Agregado fino</b> .....	24
<b>Cemento</b> .....	24
(Salazar Mayorga, 2023), .....	25
<b>Arcilla calcinada:</b> .....	25
<b>Yeso:</b> .....	25
(Salazar Mayorga, 2023) .....	25
<b>Aditivo:</b> .....	25
<b>Agua:</b> .....	26
agua potable de la red de acueducto de Bogotá. ....	26
2.2. Mezclas.....	26
2.2.1. Determinación del contenido de humedad de los agregados .....	27
2.2.2. Dosificación y preparación materiales para fundir mezclas.....	28
2.2.3. Mezclado y fundida .....	29
2.2.4. Curado .....	32
2.2.5. Preparación probetas .....	32
2.3. Ensayos .....	34
2.3.1. Porosidad .....	34
2.3.2. Módulo de elasticidad ( E ) .....	37
2.3.3. Resistencia a la compresión ( f'c ) .....	39
2.3.4. Permeabilidad al agua .....	40
2.3.5. Permeabilidad al aire .....	44

2.3.6. NORDTEST BUILD 492 (NT BUILD – 492) .....	48
2.3.7. Ensayo de estancamiento de sal (Salt ponding test - SPT) .....	55
2.3.8. Impedancia eléctrica.....	57
3. Capítulo 3 Discusión y resultados .....	61
3.1. Porosidad y densidad .....	61
3.2. Resistencia a la compresión y módulo de elasticidad.....	62
3.3. Permeabilidad al aire.....	64
3.4. Permeabilidad al agua.....	69
3.5. ENSAYO NORDTEST- 492.....	71
3.6. Ensayo de estancamiento de sal (Salt ponding test - SPT).....	72
3.7. Impedancia eléctrica .....	75
4. Capítulo 4: Comparativo entre las propiedades relacionadas con la durabilidad y la permeabilidad al aire .....	77
4.1. Análisis estadístico.....	77
4.1.1. Procedimiento .....	77
4.1.2. Hipótesis (planteamiento y validación).....	78
4.2. Comparativo con la permeabilidad al agua.....	79
4.3. Comparativo con la difusión de cloruros. (SPT). .....	80
4.4. Comparativo con la migración de cloruros (NT-BUILD 492).....	81
5. Capítulo 5 Conclusiones .....	83
6. Capítulo 6 Trabajos futuros .....	87

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1	Proporciones de Clinker y adiciones en cementos LC3 .....	17
Figura 2-1	Secado de muestras de los agregados grueso y fino.....	28
Figura 2-2	Llenado de moldes y compactado de la mezcla mediante varillado.....	30
Figura 2-3	Asentamiento mezcla de referencia MR (8-1/2") y mezcla M01 (8-3/8"). .....	30
Figura 2-4	Asentamiento mezclas M02 (6-3/4") y M03 (5-1/8").....	31
Figura 2-5	Asentamiento mezclas M04 (1-3/4") y M05 (7-5/8").....	31
Figura 2-6	Curado al agua de las muestras .....	32
Figura 2-7	Corte de muestras de un cilindro de 100 mm diámetro 200 mm altura .....	33
Figura 2-8	Muestras identificadas, marcadas y cortadas con disco diamantado .....	33
Figura 2-9	Pintado muestras para ensayos de permeabilidad al agua y NT-492.....	34
Figura 2-10	Secado de muestras para evaluación de porosidad y densidad .....	34
Figura 2-11	Saturación de muestras. ....	35
Figura 2-12	Hervido de agua potable y saturación de probetas.....	35
Figura 2-13	Lectura de la presión mediante Vacuómetro digital. ....	36
Figura 2-14	Lectura de la presión interna de la cámara de vacío mediante vacuómetro analógico. ....	36
Figura 2-15	Acondicionamiento de probeta para evaluación del módulo de elasticidad.....	38
Figura 2-16	Instrumentación de muestra para evaluación del módulo de elasticidad.....	38
Figura 2-17	Montaje y rotura de probeta en ensayo de resistencia a la compresión.....	39
Figura 2-18	Ensayo de resistencia a la compresión. ....	39
Figura 2-19	Alistado probetas para evaluación de la permeabilidad al agua. ....	40
Figura 2-20	Ensayo de permeabilidad al agua .....	41
Figura 2-21	Montaje de probetas para ensayo de permeabilidad al agua .....	41
Figura 2-22	Partido probeta para permeabilidad al agua.....	43
Figura 2-23	Relación de la permeabilidad del concreto con el coeficiente de permeabilidad y la profundidad de penetración .....	44
Figura 2-24	Permeabilímetro permeaTORR AC- v.3.0 .....	45
Figura 2-25	Equipo permeaTORR y celda de vacío listos para inicio de lectura.....	46
Figura 2-26	Esquema de funcionamiento del equipo permeaTORR. ....	46
Figura 2-27	Proceso de calibración permeaTORR.....	47
Figura 2-28	Resultado del ensayo de permeabilidad al aire. ....	48

Figura 2-29 Marcado y corte de muestras para NT-492 y otros ensayos .....	49
Figura 2-30 NaCl y NaOH debidamente certificados para prueba NT BUILD -492 .....	50
Figura 2-31 Pesado componentes solución catódica y anódica prueba NT BUILD -492 .....	50
Figura 2-32 Disposición de la base plástica y ubicación de la probeta y los electrodos para ensayo NT BUILD 492 .....	51
Figura 2-33 Montaje probeta en manga de caucho y colocación en solución catódica .....	51
Figura 2-34 Montaje probeta, electrodos, fuente e inicio ensayo NT BUILD 492.. .....	52
Figura 2-35 Tabla de voltajes a aplicar y duración del ensayo según voltaje inicial. ....	52
Figura 2-36 Montaje en paralelo de tres probetas de la misma mezcla. ....	53
Figura 2-37 Frente de precipitación del nitrato de plata en ensayo NT BUILD-492. ....	53
Figura 2-38 Ilustración de la forma de medir la profundidad de penetración de cloruros. ....	54
Figura 2-39 Preparación de probetas para ensayo SPT .....	55
Figura 2-40 Sumergido de probetas en solución salina durante 148 días para ensayo SPT	55
Figura 2-41 Prensa automax para partido de probetas de SPT.....	56
Figura 2-42 Profundidad penetración cloruros en ensayo SPT mezclas MR y M01 .....	56
Figura 2-43 Profundidad penetración cloruros en ensayo SPT mezclas M02 y M03 .....	57
Figura 2-44 Profundidad penetración cloruros en ensayo SPT mezclas M04 y M05 .....	57
Figura 2-45 Potenciostato Gamry 600+ y celda de Faraday para prueba EIS.....	58
Figura 2-46 Preparación probeta para ensayo de electro impedancia EIS.....	58
Figura 3-1 Comparativo de la porosidad entre MR y muestras adicionadas M01 a M05. ....	61
Figura 3-2 Gráfica del Módulo de elasticidad de la mezcla M04 .....	63
Figura 3-3 Comparativo coeficiente de permeabilidad al aire de todas las mezclas .....	65
Figura 3-4 Comparativo relativo entre el coeficiente $k_T$ permeabilidad de la mezcla de referencia MR y todas las mezclas adicionadas .....	66
Figura 3-5 Relación entre porcentaje de adiciones y la permeabilidad al aire .....	67
Figura 3-6 Relación entre contenido de arcilla calcinada y la permeabilidad al aire.....	67
Figura 3-7 Estimación de la vida útil en función del espesor del recubrimiento y $K_t$ .....	69
Figura 3-8 Comparativo entre las mezclas del coeficiente $K$ permeabilidad al agua.....	70
Figura 3-9 Curva Comparativo coeficiente $K$ permeabilidad al agua .....	70
Figura 3-10 Comparativo coeficiente migración de cloruros Dnsmm Nortest N-492.....	71
Figura 3-11 Comparativo entre coeficiente Dnsmm y contenido de adiciones.....	72
Figura 3-12 Comparativo profundidad penetración cloruros Salt Ponding Test.....	73

<b>Figura 3-13</b> Comparativo profundidad penetración cloruros Vs relación contenido adiciones respecto al contenido de cemento .....	74
<b>Figura 3-14</b> Comparativo resistividad eléctrica .....	75
<b>Figura 3-15</b> Comparativo entre impedancia eléctrica y proporción de adiciones respecto al contenido de cemento.....	76
<b>Figura 3-16</b> Diagrama Nyquist M03 ensayo electro impedancia .....	76
<b>Figura 4-1</b> Comparativo permeabilidad al aire y permeabilidad al agua .....	79
<b>Figura 4-2</b> Formación de burbujas y goteo debido al desprendimiento de la pintura.....	79
<b>Figura 4-3</b> Comparativo entre permeabilidad al aire con profundidad de penetración de cloruros. Salt Ponding Test.....	80
<b>Figura 4-4</b> Comparativo permeabilidad al aire con migración de cloruros NT BUILD 492. ....	81

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 2-1</b> Propiedades físicas del agregado grueso. ....	24
<b>Tabla 2-2</b> Propiedades físicas del agregado fino. ....	24
<b>Tabla 2-3</b> Propiedades físicas del cemento de referencia. ....	25
<b>Tabla 2-4</b> Propiedades físicas de la caliza, arcilla calcinada y yeso. ....	25
<b>Tabla 2-5</b> Proporciones porcentuales en masa de mezclas de cemento de referencia (MR) y mezclas adicionadas en proporciones AC : CA.....	26
<b>Tabla 2-6</b> Proporciones porcentuales finales en masa de materias primas por mezcla .....	27
<b>Tabla 2-7</b> Cantidades de agregados y agua para cada mezcla.....	28
<b>Tabla 2-8</b> Cantidades de cemento ART, adiciones y aditivo para cada mezcla.....	29
<b>Tabla 2-9</b> Peso total materiales por mezcla y slump real medido. ....	29
<b>Tabla 3-1</b> Porosidad y densidad NTC-5653 (ASTM C-642) .....	61
<b>Tabla 3-2</b> Resistencia a la compresión y módulo de elasticidad.....	62
<b>Tabla 3-3</b> Resistencia a la compresión y módulos de elasticidad. ....	63
<b>Tabla 3-4</b> Coeficientes kT de permeabilidad al aire. ....	65
<b>Tabla 3-5</b> Coeficiente kT, profundidad de penetración y proporciones de mezcal.....	66
<b>Tabla 3-6</b> Estimación de la vida útil en función del coeficiente kT y el recubrimiento.....	68
<b>Tabla 3-7</b> Coeficiente K de permeabilidad al agua, profundidad de penetración y proporciones de mezcla. ....	70
<b>Tabla 3-8</b> Coeficiente Dnsm, profundidad de penetración y proporciones de mezcla.....	71
<b>Tabla 3-9</b> profundidad de penetración SPT y proporciones de mezcla.....	73
<b>Tabla 3-10</b> Resistividad eléctrica. Ensayo electro impedancia .....	75
<b>Tabla 5-1</b> Comparativo valores pruebas de durabilidad.....	84

## Lista de abreviaturas

### Abreviaturas

Abreviatura	Término
AC	Arcilla calcinada
ACI	American Concrete Institute
ART	Alta resistencia temprana
ASTM	American Standard Test Materials
CA	Caliza
CCS	Carbon Capture and Storage
CPO	Cemento Portland
CSI	Cement Sustainability Initiative
Dnssm	Coeficiente migración de cloruros condición no estacionaria m <sup>2</sup> /s
E	Módulo de elasticidad (MPa)
EPFL	Escuela Politécnica Federal de Lausana
f'c	Resistencia a la compresión (MPa)
K	Coeficiente de permeabilidad al agua (m/s)
kT	Coeficiente de permeabilidad al aire m <sup>2</sup>
LC3	Limestone Calcined Clay Cement (cemento de caliza y arcilla calcinada)
MR	Mezcla de referencia
M01-M05	Mezclas 01 a mezclas 05
NTC	Norma Técnica Colombiana
SPT	Salt Ponding Test (ensayo de estancamiento de sal)



# Introducción

## **El problema**

Cuando se proyecta una obra de ingeniería, un aspecto fundamental a considerar es la vida útil que se espera tenga dicha obra. Es decir, estamos definiendo un período mínimo de tiempo durante el cual va a prestar de forma segura y eficiente los servicios y beneficios para los cuales fue concebida. Estamos exigiendo que dure un tiempo mínimo que justifique su construcción y que durante por lo menos ese período no se deteriore al punto de tener que ser intervenida o desechada cuando las afectaciones hagan que los costos de reparación sean económicamente inviables.

Partiendo de esa primera condición se escogen los materiales principales que constituyen la estructura del proyecto (ingeniería), teniendo en cuenta aspectos económicos (economía), disponibilidad de materiales y recursos (sostenibilidad), facilidad de construcción, impacto ambiental y social.

El concreto es el material que cumple mayormente todas las anteriores condiciones y ha sido escogido en la mayoría de los proyectos por su gran versatilidad, facilidad de preparación, economía, disponibilidad de insumos y durabilidad. Por su uso tradicional es el material que genera más confianza. En estado fresco es una mezcla que se ajusta a cualquier forma que se le desee dar y en ese estado las propiedades que interesan son la consistencia y la manejabilidad. Una vez endurecida la mezcla y obtenida la forma que le queremos dar, las propiedades que interesan son la resistencia y las relacionadas con la durabilidad.

Para que un concreto sea durable debe tener la capacidad suficiente para resistir de forma adecuada los ataques de los agentes agresores que lo deterioran. Uno de los grandes

enemigos de las estructuras de concreto reforzado es la corrosión del refuerzo generada a partir de procesos bien sea de carbonatación o de sulfatación. Por sus características el concreto presenta un PH alto (12 a 13) que actúa como un inhibidor de la corrosión protegiendo el refuerzo. Cuando el PH se reduce (11 o menos), por cualquiera que sea la causa, el refuerzo queda expuesto a la corrosión. Una vez se presenta esta condición la resistencia y durabilidad de la estructura quedan comprometidas. El ataque de ácidos, las reacciones álcalis-agregados, los procesos de humedecimiento-secado, y congelamiento-descongelamiento son agentes y patologías que también comprometen la vida útil de las estructuras. Para que se llegue a cualquiera de estas situaciones deben previamente darse unas condiciones que faciliten el desarrollo de esta patología. Debe existir un agente agresor, un medio de transporte y un mecanismo de penetración. Muchas veces un agente agresor lo que hace es disminuir las defensas y permitir que otro agente ataque aprovechando esa carencia de defensas.

El  $\text{CO}_2$  presente en la atmosfera o disuelto en otro medio reacciona químicamente con el calcio del concreto iniciando el fenómeno de la carbonatación que produce una disminución del PH del concreto y por tanto facilita la corrosión del refuerzo.

La corrosión como una degradación física del acero no solo reduce el área efectiva de refuerzo, sino que, al igual que el agua al congelarse, el material corroído aumenta su volumen generando grandes esfuerzos de tensión que producen fisuras en el concreto, especialmente en la zona de recubrimiento.

Para hacer frente a este fenómeno se han diseñado diferentes estrategias, desde la aplicación de pinturas protectoras del refuerzo, aditivos inhibidores de la corrosión, productos que mejoren la impermeabilidad del concreto, hasta recubrimientos que aíslen el elemento del medio ambiente.

El  $\text{CO}_2$  no solo es el causante de la carbonatación del concreto, sino que también es uno de los principales causantes del cambio climático debido al calentamiento global. La industria de la construcción en general ha sido señalada como responsable de la producción de casi la mitad de este gas y su generación básicamente se produce durante la fabricación del cemento, insumo esencial del concreto. El cemento es tal vez después del agua el insumo

más utilizado. En su proceso de producción se genera aproximadamente un 8% del CO<sub>2</sub> liberado a la atmosfera.(Olivier et al., 2016)

Para combatir este cambio climático existen acuerdos internacionales (acuerdo de Paris) plasmados en compromisos de casi todas las naciones para alcanzar unos objetivos propuestos en unas fechas específicas. Uno de estos objetivos es reducir el calentamiento en 2 °C respecto a los niveles de la era preindustrial mediante la disminución de las emisiones de gases tipo invernadero, en este caso el CO<sub>2</sub>.(ONU, 2015)(FICEM & PROCEMCO, 2021)

Para lograr este efecto se plantean cuatro grandes frentes, a saber:

Eficiencia térmica y eléctrica. Implica la actualización de hornos y equipos para que requieran menos energía en la producción de cemento.

Uso de combustibles alternativos. Se propone el cambio gradual de combustibles fósiles a otros alternativos como la utilización de biomasa y residuos.

Sustitución de Clinker. Utilizando cenizas volantes, caliza, arcillas calcinadas.

Capturas y almacenamiento de las emisiones. Principalmente en el proceso de clinkerización.

La industria cementera ha respondido mediante la producción de unos cementos ecológicos llamados limestone calcined clay cement (LC3) que son el resultado de la sustitución de parte del Clinker portland con arcillas calcinadas y caliza y que han mostrado reducciones hasta en un 40% de las emisiones de CO<sub>2</sub> durante su producción. (Zunino et al., 2021)

Puesto que es un producto relativamente nuevo y aún no se han expedido normas específicas que reglamenten su producción y uso, es importante evaluar sus propiedades y compararlas con las de los cementos tradicionales de forma que se formulen las recomendaciones pertinentes para su adecuado uso. En esta investigación se pretende estudiar básicamente las propiedades de permeabilidad y durabilidad de cinco mezclas de concreto preparado con LC3 frente a una mezcla de referencia preparada con un cemento tradicional.

## Justificación

Medio ambiente, durabilidad y permeabilidad son tres conceptos íntimamente relacionados con el cemento y que permiten ver desde tres puntos de vista la realidad a diferentes escalas.

- **Construir con concretos dosificados con cementos adicionados con caliza y arcillas calcinadas contribuye a la reducción del calentamiento global como consecuencia de la disminución de emisiones de dióxido de carbono generado en el proceso de clinkerización del cemento comparado con los cementos tradicionales.**(Zunino et al., 2021)

Producir un kilogramo de cemento portland genera aproximadamente 900 gr de CO<sub>2</sub>. Si se tiene en cuenta que en Colombia se producen aproximadamente 1.200.000 de toneladas de cemento mensualmente (en el mes de junio de 2022 la producción fue de 1.189.000 toneladas) (DANE, 2022) se puede tener una idea de la magnitud de las emisiones y esto es sólo a nivel nacional, porque si se considera que Colombia está en el puesto 40 de 184 en el ranking de las emisiones de CO<sub>2</sub> por países la cifra ya es escandalosa (Datosmacro.com, 2021). Si se adoptan normas ecológicas más severas, como el incremento en los impuestos a aquellos cementos que emitan más de 600 Kg de CO<sub>2</sub> por tonelada, las implicaciones económicas serán enormes (Prensa Latina, 2021).

Dentro de las estrategias planteadas en los acuerdos de Paris y en la hoja de ruta nacional (FICEM & PROCEMCO, 2021) para reducir el calentamiento global se contempla la sustitución de una parte del Clinker portland por una adición que sea químicamente inerte y por tanto disminuya las emisiones de CO<sub>2</sub>. Los cementos adicionados con arcilla calcinada y caliza, llamados LC3, han permitido lograr reducciones de hasta en un 40% de las emisiones de dióxido de carbono.

- **Producir un concreto dosificado con cemento adicionado con caliza y arcillas calcinadas es más económico que producirlo con un cemento tradicional debido a la abundancia y facilidad de obtención de los insumos necesarios.**(Martirena & Scrivener, 2019); (Scrivener, Martirena, et al., 2018)

Para producir una tonelada de cemento portland tradicional se requieren 600 J, los cuales son consumidos mayormente en el proceso de clinkerización. Producir la misma tonelada de un cemento adicionado con arcilla calcinada y caliza consume aproximadamente 400 J, o sea una tercera parte menos. Este ahorro energético se traduce en un ahorro económico que incide favorablemente en el sector de la construcción que es uno de los principales motores de la economía. La industria de la construcción es un factor generador de fuentes de trabajo y en especial de la mano de obra no calificada. Para producir un concreto dosificado con cemento adicionado con caliza y arcillas calcinadas se necesita la misma tecnología que para producir un concreto dosificado con un cemento convencional. Este aspecto es tal vez el más atractivo para los productores de cemento que son renuentes a los cambios tecnológicos que impliquen grandes inversiones que obligatoriamente afectarían el precio final del producto. Adicional a la facilidad de su producción se tiene el beneficio de cumplir con las reglamentaciones ambientales.

- **Reducir el costo de producción de un concreto incentiva el crecimiento de la industria de la construcción y por tanto genera mayores beneficios al generar más empleo.**

La construcción como uno de los grandes motores de la economía en la medida que recibe beneficios los puede transmitir de vuelta a la sociedad. Como consecuencia directa del abaratamiento de los costos de producción del concreto se genera una mayor demanda de estos productos lo que a su vez genera obligatoriamente un incremento en la mano de obra necesaria para producir estos bienes. Es una cadena de retroalimentación que finalmente se traduce en beneficios económicos, sociales y ambientales.

- **Las estructuras construidas con concretos dosificados con cementos adicionados con caliza y arcillas calcinadas son tan durables como aquellas construidas con concretos dosificados con cementos tradicionales.** (Ramezaniapour et al., 2020)

La durabilidad de las estructuras de hormigón armado está directamente relacionada con la capacidad de éste a resistir los agentes agresores disueltos en el agua o presentes en el aire. Un concreto durable es aquel que no permite o dificulta el ingreso de esos agentes que lo degradan y corroen el acero de refuerzo. En teoría, una estructura durable sería aquella que no permitiera el ingreso de ningún agente o elemento nocivo, es decir que esté hecha con un hormigón impermeable. La durabilidad se ha definido como la capacidad de resistir acciones

de meteorización, ataques químicos, abrasión o cualquier otro proceso de deterioro y que un concreto durable debe conservar su forma, calidad y mantener las características originales al ser expuesto a cualquier ambiente agresivo. (ACI 201.2R-01 et al., 2001), la durabilidad de una estructura tiene como principal enemigo la corrosión del acero de refuerzo, y esta corrosión se ve favorecida por fenómenos como la carbonatación causada por el  $\text{CO}_2$  proveniente mayoritariamente del medio ambiente.

Desde un punto de vista microscópico, hay que adentrarse en la estructura del hormigón y ver los caminos que llevan a los agentes agresores,  $\text{CO}_2$  entre ellos, hasta el acero de refuerzo y lo degradan reduciendo su vida útil y por tanto su durabilidad. Lo intrincado de estos caminos y sus dimensiones tienen que ver con la porosidad y por tanto con la permeabilidad que parece ser la única propiedad que puede relacionarse directamente con la durabilidad a largo plazo. La evidencia muestra que los problemas de durabilidad de los concretos serían menores y no tendrían consecuencias si fueran impermeables durante los periodos de exposición a los agentes agresores y permanecieran así durante la vida útil. (Mehta, 1991).

La permeabilidad, tanto al aire como al agua, permiten inferir el comportamiento futuro de un concreto frente a los agentes agresores y por tanto se constituyen en una medida de la durabilidad potencial de una estructura. (NTC-5551, 2007), pero no existe un método que sea globalmente aceptado para caracterizar la estructura de poros del concreto, o un modelo que permita predecir la resistencia a los ataques de los diferentes agentes agresores.

Cuando se dosifica un concreto con un cemento adicionado con arcillas calcinadas y caliza se mejora la estructura de poros de éste debido a la sinergia que hay entre la arcilla calcinada y la caliza que ayuda a incrementar la formación de productos de hidratación del cemento, y a una disminución del tamaño de los poros debido al acomodamiento de los granos de estas adiciones que son de menor tamaño que los granos de cemento. Al anterior beneficio se suma un incremento de la tortuosidad de la estructura de poros que conduce a una reducción de la permeabilidad del concreto y por tanto a una mejora de la durabilidad de las estructuras.

Es evidente que las condiciones de los concretos preparados en obra son diferentes a la de los concretos preparados en el laboratorio y por tanto estos últimos no representan fielmente las condiciones de los primeros y que los ensayos tradicionales tendientes a evaluar las propiedades relacionadas con la durabilidad son en general de carácter invasivo. Se propone

investigar las propiedades relacionadas con la permeabilidad al aire utilizando como referencia la obtenida con el método Torrent, que es un ensayo no invasivo ni destructivo, diseñado pensando en las condiciones reales del concreto. Este método permite medir el coeficiente de permeabilidad al aire del concreto de recubrimiento en un tiempo muy corto (seis minutos) y de un modo no destructivo. (Ebensperger & Torrent, 2014)

## **Motivación**

**Producir un cemento que mejore la durabilidad mediante la reducción de la permeabilidad del hormigón y a su vez reduzca su contribución al efecto invernadero tendrá un impacto no sólo económico sino también ambiental, por lo que evaluar la permeabilidad se constituye en un factor importante como medida de la durabilidad.**

Aunque existen investigaciones a nivel global sobre el tema es importante estudiar concretos preparados con cementos ecológicos producidos en el país.

## **Objetivos**

Objetivo general

Evaluar las propiedades de permeabilidad al aire y durabilidad de concretos adicionados con caliza y arcillas calcinadas.

Objetivos específicos

1. Analizar la influencia de la caliza y la arcilla calcinada en la permeabilidad al aire, difusión de cloruros, coeficiente de migración de cloruros, absorción, porosidad, densidad, resistividad, y resistencia a la compresión
2. Analizar la relación entre las propiedades evaluadas y la permeabilidad al aire de concretos dosificados con cementos adicionados con caliza y arcillas calcinadas,
3. Examinar los antecedentes teóricos que fundamenten los principales mecanismos y factores que influyen en la permeabilidad al aire y su repercusión en la durabilidad de hormigones preparados con cementos LC3.

## **Estructura de la tesis**

La tesis se ha estructurado en seis capítulos, a saber.

Capítulo 1. Estado del arte. Literatura. Una breve discusión sobre la sostenibilidad de la industria cementera, el uso de puzolanas y adiciones minerales. La durabilidad y los factores que la afectan. Los cementos LC3, su sostenibilidad y su aporte como solución a los problemas ambientales generados por las emisiones de CO<sub>2</sub>; sus propiedades mecánicas y las relacionadas con la durabilidad

Capítulo 2. Materiales, métodos y ensayos.

Presentación de las características de los materiales utilizados para la preparación de las mezclas a estudiar. Los ensayos escogidos para evaluar las propiedades mecánicas y las relacionadas con la durabilidad de las mezclas diseñadas por el grupo de investigación en análisis y diseño y los métodos de esos ensayos.

Capítulo 3. Discusión y resultados

A partir de los resultados obtenidos en los ensayos escogidos se hace una breve discusión sobre los aspectos más relevantes de esos resultados relacionados con el uso de la arcilla calcinada y la caliza como adiciones minerales.

Capítulo 4. Comparativo de las propiedades relacionadas con la durabilidad y la permeabilidad al aire.

El objetivo general de esta investigación es el estudio de la permeabilidad al aire utilizando el equipo permeaTORR de la Universidad Nacional y comparar esos resultados con las propiedades relacionadas con la durabilidad. Se compara la permeabilidad al aire con la difusión y migración de cloruros, así como con la resistividad eléctrica.

Capítulo 5. Conclusiones De acuerdo con los resultados obtenidos y con las comparaciones hechas en el capítulo anterior se listan las conclusiones sobre las mejoras en el desempeño de los cementos adicionados con arcilla calcinada y caliza

Capítulo 6. Trabajos futuros. Algunas sugerencias sobre los aspectos que el autor considera se deben estudiar o profundizar en su conocimiento.



# 1. Capítulo 1

## Estado del arte

### 1.1. Sostenibilidad y materiales de construcción

El cemento está ligado al desarrollo de la sociedad y ha contribuido a su bienestar a través de múltiples aspectos como la construcción de obras de infraestructura (puentes, termoeléctricas, hidroeléctricas, terminales aéreos y marítimos, túneles, instalaciones industriales, plantas de tratamiento), vivienda y muchas otras más. Desde sus inicios hace casi 200 años ha mostrado sus bondades y beneficios y es por eso que se dice que después del agua el concreto y por tanto el cemento es el producto más utilizado por ser económico, versátil y durable. Pero para que el uso del cemento siga teniendo ese lugar privilegiado necesita ante todo ser sostenible, entendiendo que Sostenibilidad y Desarrollo Sostenible, implican mantener de forma continua un proceso cuyo objetivo final es garantizar que la vida del planeta pueda seguir transcurriendo de forma segura. La sostenibilidad se fundamenta en cuatro componentes: ambiental, social, económico y energético. (Asociación de fabricantes de cemento portland, 2014)

La sostenibilidad se trata de mantener la industria cementera funcionando sin el temor de extinguirse por falta de disponibilidad de insumos que no sean perjudiciales para el ambiente y que mejoren la calidad de vida de la sociedad en general.

Bajo los lineamientos de Cement Sustainability Initiative (CSI) la industria cementera hace grandes esfuerzos para introducir soluciones de mitigación y reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Las políticas promovidas para mejorar la eficiencia y acelerar la descarbonización se basan en cuatro puntos principales:

1. Eficiencia térmica y eléctrica. Implica la actualización tecnológica de hornos y equipos para que se requiera menos energía en la producción del cemento. Esto implica cambiar el diseño de plantas, actualización de molinos y equipos, aplicación de inteligencia artificial en el monitoreo de las operaciones, molienda más eficiente y optimización en la recuperación de calor perdido, lo que permite reducir los costos de operación entre un 10 y 15%.
2. Uso de combustibles alternativos. Pasar gradualmente de combustibles de origen fósil a combustibles alternativos como biomasa y utilización de residuos provenientes de otros procesos.
3. Sustitución de Clinker. Puesto que es en el proceso de clinkerización donde se genera la mayor parte de CO<sub>2</sub> y donde más sensible es la industria cementera desde el punto de vista de la sostenibilidad, se propone la sustitución de Clinker con insumos que generen menos emisiones de CO<sub>2</sub> en su proceso. Aquí es donde entran las arcillas calcinadas y calizas como materiales cementicios suplementarios.
4. Captura y almacenamiento de emisiones (Carbon Capture and Storage CCS). Este punto es tal vez el de más difícil cumplimiento debido a la magnitud de las obras necesarias y de la falta de normas que regulen estos procesos.

La sostenibilidad de la industria cementera debe desarrollarse en cada una de las fases del proceso de producción. A partir de los compromisos adquiridos para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> se ha tomado mayor conciencia de la necesidad de afrontar la situación a partir de estas estrategias.

Dependiendo de su origen los cementos tienen diferentes tipos de insumos. Unos son de origen natural como la caliza, la caolinita, el yeso; otros son provenientes de residuos de otros procesos industriales como cenizas volantes o escorias y otros son específicamente producidos para dar o mejorar alguna propiedad en particular y estos son los aditivos. Dentro de estos grupos los más susceptibles de escasear son los provenientes de otros procesos industriales bien sea porque la creciente demanda de cemento supere ampliamente la disponibilidad de estos insumos o porque las regulaciones ambientales restrinjan su producción. Tal es el caso de las cenizas volantes y de las escorias de altos hornos.

Es entonces cuando se hace importante el sustituir estos insumos por otros que sean de fácil consecución, abundantes, amigables con el medio ambiente y económicos. Las arcillas

caoliníticas y la caliza cumplen las anteriores condiciones y a partir de eso se han desarrollado como materiales cementicios suplementarios que ayudan a garantizar la sostenibilidad de la industria cementera.

Puesto que los cementos LC3 presentan propiedades similares o mejores a las del cemento portland, pero con la ventaja de una reducción del Clinker hasta en un 50% mediante la sustitución por arcilla calcinada y caliza, se puede garantizar su sostenibilidad debido a la abundancia y disponibilidad de estos materiales cementicios suplementarios en todo el planeta. Se estima que, con una sustitución de unos 15 millones de toneladas por año, y con una reducción del factor Clinker a valores cercanos al 55% representa una reducción aproximada del 12% de las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas en el proceso productivo del cemento. (Martirena & Scrivener, 2019)

Otro aspecto a favor de la sostenibilidad a partir de cementos ternarios LC3 es la facilidad de adaptar el proceso a la industria actual sin necesidad de mayores costos de inversión ni de operación, lo que hace más atractiva esta alternativa.

## 1.2. Adiciones minerales

Son materiales que pueden tener origen natural o artificial y que se adicionan al cemento con el fin de modificar algunas propiedades del concreto y mejorar el desempeño de acuerdo al fin que se requiera. Las propiedades de la mezcla modificadas en estado fresco son aquellas relacionadas principalmente con la manejabilidad, consistencia, cohesión, segregación, tiempo de fraguado, sangrado, y en estado endurecido las propiedades relacionadas con la resistencia y la durabilidad.

Las adiciones son materiales cementantes suplementarios que buscan principalmente reducir la cantidad de Clinker en el cemento sin desmejorar las propiedades de éste. Se denominan suplementarios porque son sustitutos o complementos utilizados para mejorar alguna deficiencia o para potenciar alguna propiedad. Se agregan también con el fin de mejorar los procesos productivos mediante la reducción de la energía requerida y las emisiones de gases contaminantes.

Dentro de los beneficios derivados del uso de adiciones minerales podrían citarse

1. Mejoran la durabilidad. (Almas et al., 2021)
2. Menor calor de hidratación.(Krishnan et al., 2020b)
3. Ahorro de energía.(Ruíz Rosa et al., 2017)
4. Reducción de las emisiones contaminantes protegiendo el medio ambiente(Zunino et al., 2021)
5. Mejora las resistencias.(Almas et al., 2021)
6. Ayuda a eliminar residuos generados en otros procesos industriales.(Asociación de fabricantes de cemento portland, 2014)

### 1.3. Puzolanas

Son adiciones inorgánicas pertenecientes al grupo de materiales cementantes suplementarios que pueden tener un origen natural como las cenizas volcánicas, toba, tufa y tierras diatomeas, o un origen artificial como las cenizas volantes, el humo de sílice, escoria de alto horno, arcillas calcinadas.

Las cenizas volantes son un subproducto de la combustión del carbón en las plantas termoeléctricas. Dependiendo de la clase de carbón utilizado las cenizas contienen aluminio, silicio, magnesio, hierro y calcio. Estos compuestos están presentes hasta en un 85% de las cenizas volantes. Con una sustitución entre el 30 y el 35% del cemento se obtienen mejoras en la trabajabilidad, la resistencia a edades tempranas, porosidad, permeabilidad, cohesividad. (Muñoz López, 2020)

El humo de sílice se obtiene como un residuo de los hornos eléctricos en el proceso de producción de aleaciones de silicio o ferro silicio. Usualmente contiene hasta un 85% de microesferas de sílice provenientes de la reducción del cuarzo de alta pureza con el carbón. Ha sido utilizado como un sustituto parcial o como adición en una proporción de 5 a 15%. Disminuye la exudación y por tanto contribuye a disminuir la permeabilidad lo que se traduce en una mejora de la durabilidad. También incrementa las resistencias a la compresión.

La escoria de alto horno se obtiene como un residuo en la producción del acero a temperaturas cercanas a los 1500 °C que una vez es finamente molida adquiere propiedades cementantes. Mediante procesos de enfriamiento brusco se logra la cristalización de la escoria, la cual puede clasificarse en cristalizada, expandida y vitrificada. Esta última es la que

se utiliza como adición del cemento. Se requiere que por lo menos dos terceras partes de su masa sean fases vítreas y contenga CaO, MgO y SiO<sub>2</sub>. Para que la escoria pueda considerarse como material cementante debe tener una composición química de CaO entre 30 y 45%, SiO<sub>2</sub> entre 30 y 48%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> entre 15% y 25% y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> entre 0.5 y 2%, (MS SHETTY & AK JAIN, 1982). La escoria como material suplementario se adiciona en una proporción entre 5% y 60% obteniéndose una mejora en la manejabilidad de la mezcla, pero principalmente mejora el comportamiento frente a agentes agresivos externos sulfatos, cloruros, y CO<sub>2</sub>.

### 1.3.1. Las arcillas caolinitas (metacaolín)

por sí mismas no tienen propiedades puzolánicas, pero sus cualidades como material suplementario se activan al ser calcinadas a temperaturas comprendidas entre 600 °C y 1000 °C. Usualmente la sustitución varía entre un 10 y 20% y con ello se logra una reducción de la permeabilidad, un aumento de la resistencia, una mejora en la manejabilidad y por tanto una mejor durabilidad. La arcilla caolinítica utilizada en esta investigación es una arcilla de baja gradación pues sólo contiene un 40% de caolinita.

La norma ASTM C-618 establece los requisitos físicos y químicos que deben cumplir las puzolanas para ser usadas en los cementos portland adicionados. (ASTM International, 2003)

## 1.4. Propiedades de transporte – durabilidad

La transferencia de masa dentro del concreto puede suceder básicamente de tres formas:

1. Difusión.

Proceso de transporte de una sustancia o elemento dentro de un medio cualquiera por causa de una agitación aleatoria a escala molecular. Es decir, cuando en un medio, concreto en este caso, existe una sustancia que presenta diferencia de concentración entre dos puntos cualquiera, un movimiento aleatorio genera un transporte global de dicha sustancia desde la zona con mayor concentración hacia la zona con menor concentración hasta que se establezca un equilibrio. Entonces para que se presente este mecanismo de transporte se requiere que el concreto esté saturado.

2. Permeabilidad.

Es el movimiento de un fluido dentro de un medio por causa de una diferencia o gradiente de presión. En el caso de la permeabilidad al agua en el concreto, se requiere que se encuentre totalmente saturado, requisito no necesario para el caso de la permeabilidad al aire o gases.

La permeabilidad se determina a partir de una presión, bien sea hidrostática o atmosférica sobre una de las caras del elemento y corresponde a la velocidad o caudal que atraviesa el medio como consecuencia de esa presión.

3. Migración

Se entiende como el desplazamiento de una sustancia o agente agresor dentro del concreto

Por uno o varios de estos mecanismos los agentes agresores atacan el concreto. Estos agentes se deben desplazar a través de una matriz de poros o microestructura que dependiendo de su tamaño determina el grado de exposición de la estructura. Por eso es importante conocer cómo se forman para así tratar de controlar su formación.

Se pueden clasificar los poros según su tamaño en:

- a. Poros de gel. Son los más pequeños y ofrecen gran dificultad al paso de los agentes agresores, Su formación es inevitable.
- b. Poros de aire incorporado. Son poros aislados de gran importancia cuando se pretende dar ciertas características al concreto, como manejabilidad en estado fresco y resistencia a procesos de congelamiento y descongelamiento en estado endurecido. No contribuyen significativamente a la permeabilidad por estar aislados.
- c. Poros de aire o macroporos. Se generan por deficientes en la compactación de la mezcla. Por su tamaño facilitan el ingreso de agentes agresores hasta el acero de refuerzo además de reducir la resistencia mecánica de la estructura.
- d. Poros capilares. Son causados por la evaporación del agua no necesaria en los procesos de hidratación del cemento. Constituyen un peligro puesto que pueden ofrecer un camino que facilite a los agentes agresores llegar hasta el acero de refuerzo.

Resistir los ataques de los agentes agresores de forma adecuada es básicamente el concepto de durabilidad.

Los principales causantes del deterioro de una estructura de concreto y que por tanto afectan su durabilidad son:

1. Corrosión del acero inducida por carbonatación.

Es el deterioro debido a la penetración por difusión de  $\text{CO}_2$  del medio ambiente, en condiciones de humedad, el cual reacciona con los productos de hidratación del cemento  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  para formar carbonato de calcio  $\text{CaCO}_3$ . (Torrent et al., 2022)

Este proceso produce la reducción del PH de la solución de poros causando una alteración del equilibrio termodinámico del acero de refuerzo de una condición pasiva a una de corrosión. El grado de corrosión al igual que el de carbonatación depende de las condiciones de humedad.

Básicamente, para hacer frente a este fenómeno se debe:

- a. Proveer un buen espesor de concreto de recubrimiento.
- b. Lograr una estructura de poros lo más densa posible.
- c. Seleccionar un tipo de cemento con una buena reserva de material carbonatable.

2. La corrosión inducida por cloruros.

Se produce a partir de la penetración de iones cloruro contenidos en una solución salina en contacto permanente o esporádico con la estructura. El ingreso de estos iones se produce principalmente por permeabilidad de una solución salina sometida a presión hidrostática o por succión capilar cuando no existe esta presión. La situación se complica cuando se presentan ciclos de humedecimiento y secado donde la difusión es el principal mecanismo de penetración. Una vez el frente de penetración alcanza el refuerzo se produce una depasivación del acero dando inicio a la corrosión. (Maraghechi et al., 2018)

3. Ataque químico, mayormente por sulfatos presentes en el suelo o en aguas subterráneas y por ácidos presentes en sistemas de aguas residuales. (ACI 201.2R-01 et al., 2001)

4. Reacciones álcalis-agregados.

Este proceso de deterioro se presenta cuando los álcalis presentes en la solución de poros ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ) interactúan químicamente con ciertos minerales presentes en el agregado, principalmente algunas formas de silicio, en cantidades suficientes y en presencia de humedad, produciendo un gel expansivo que dependiendo de las condiciones puede o no resultar en grandes deformaciones, agrietamientos, pérdidas

de masa y hasta desintegración total de la estructura. (Torrent et al., 2022), (ACI 201.2R-01 et al., 2001)

5. Procesos sucesivos de congelamiento y descongelamiento.

Se presenta en concretos total o parcialmente saturados expuestos a temperaturas bajo cero. El agua contenida en los poros se congela aumentando su volumen hasta un 8%, empujando el agua que no se ha congelado dentro de la estructura capilar generando presiones dañinas sobre las paredes. Los procesos de congelamiento y descongelamiento continuos resultan en agrietamientos que van acumulando daño hasta el punto de producir descamamiento y desconchados paralelos a la superficie de la estructura. Este fenómeno se agrava si el líquido en los poros contiene sal.

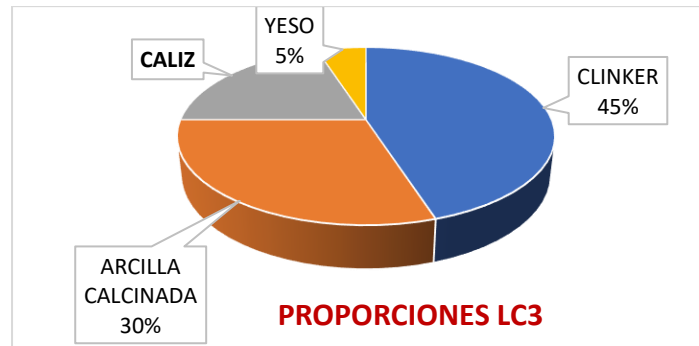
Para prevenir el daño causado por este proceso se recurre a la incorporación de burbujas de aire en cantidades y tamaños suficientes para ayudar a aliviar las presiones de expansión. Adicionalmente se debe generar una estructura de poros muy fina especificando una baja relación w/c. (Torrent et al., 2022)

Todos estos procesos suceden dentro de la microestructura de poros y tienen en común la transferencia de masa. Para que puedan ocurrir necesitan la presencia de agua.

## 1.5. Cementos adicionados con arcilla calcinada y caliza (LC3)

Los cementos de arcilla calcinada y caliza, (limestone calcined clay cements), LC3; son una familia de cementos relativamente nuevos a los que en su proceso de producción se les ha sustituido parte del Clinker portland por arcilla calcinada y caliza, permitiendo llegar a factores Clinker del orden del 45% con contenidos de arcilla calcinada de baja gradación de hasta el 30%, caliza hasta un 20% y yeso 5%. Ver Figura 1-1.



**Figura 1-1** Proporciones de Clinker y adiciones en cementos LC3

(Asociación de fabricantes de cemento portland, 2014)

Aun cuando se conoce la gran reactividad de las arcillas activadas desde hace ya bastante tiempo, es tan sólo recientemente que se han venido desarrollando como respuesta a varios aspectos, sobre todo ambientales. Estos cementos presentan mejoras sustanciales en la mayoría de las propiedades mecánicas en estado endurecido del concreto como es la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad. Las propiedades relacionadas con la durabilidad también presentan una mejora como son la permeabilidad, la resistencia a la difusión y migración de cloruros. Tal vez la única propiedad que presenta un menor desempeño es la resistencia a la carbonatación debido a la disminución del PH de la mezcla, que favorece los procesos de corrosión de las armaduras.

### 1.5.1. Sostenibilidad

Los cementos adicionados con escorias de alto horno o con cenizas volantes o con humo de sílice tienen comprometida su sostenibilidad debido a que la producción de estas adiciones no crece al mismo ritmo que crece la demanda de cemento. Por el contrario, la industria del acero, proveedora de la escoria de alto horno, para cumplir con los requisitos de sostenibilidad y regulaciones ambientales viene reciclando la chatarra con la consecuente disminución de la producción de escoria. Similarmente, las cenizas volantes, un subproducto o residuo de la combustión del carbón también están siendo limitadas por razones ambientales. Entonces las arcillas calcinadas y la caliza, que abundan en la corteza terrestre, utilizadas conjuntamente como material cementante suplementario son una alternativa como solución a la escasez inminente de cenizas volantes, escoria y humo de sílice, ofreciendo mejores garantías a la sostenibilidad de la industria cementera. (Krishnan et al., 2020a)

### 1.5.2. Factores ambientales:

Las regulaciones exigen que se reduzcan las emisiones de CO<sub>2</sub> en todos los procesos industriales. En el caso concreto de la industria del cemento, **prácticamente la única alternativa para reducir las emisiones a los niveles establecidos son los LC3**. Las arcillas calcinadas utilizadas conjuntamente con la caliza como materiales cementantes suplementarios reducen estas emisiones generadas en el proceso de clinkerización hasta en un 40%. Un estudio realizado por Zunino, Martirena, Scrivener muestra que el impacto ambiental generado por los cementos LC3 producidos bajo las peores condiciones tecnológicas, es todavía menor que el producido por el cemento portland ordinario utilizando la mejor tecnología disponible. (Zunino et al., 2021)

### 1.5.3. Economía:

Desde el punto de vista económico han mostrado que su producción puede hacerse con la tecnología existente y que ofrece reducciones en los costos de producción hasta de un 15%. (Almenares Reyes et al., 2018). La calcinación de la arcilla puede hacerse en equipos similares a los utilizados en la producción de cemento portland con la ventaja que la temperatura de calcinación está entre 750 – 850 °C mientras que la de clinkerización es del orden de 1450 °C. Esa disminución en la temperatura también se refleja en menores costos de energía. Pero la mayor reducción de costos se debe a la sustitución del Clinker y la posibilidad de utilizar grandes cantidades de caliza.

## 1.6. Propiedades de los concretos adicionados con arcilla calcinada y caliza relacionadas con la durabilidad

### 1.6.1. Porosidad

La porosidad es la propiedad que mayormente controla la difusión de iones cloruro a través del concreto. Debido al tamaño de las partículas de arcilla se ha encontrado que la red de poros que se genera es más refinada comparada con la de cualquier otro concreto y esto se traduce en una baja permeabilidad que es la que le da la resistencia a la penetración de los agentes agresores.

### 1.6.2. Permeabilidad:

Desde el punto de vista de la durabilidad puede decirse que la permeabilidad es una medida indirecta de ella. Diferentes autores resaltan el hecho que, si una estructura es impermeable durante su vida útil y está expuesta a diferentes agentes agresores, no se verá afectada por problemas de durabilidad como la corrosión, el ataque de sulfatos, carbonatación, ciclos de congelamiento – descongelamiento. (Mehta, 1991), (Ebensperger & Torrent, 2014), (NTC-5551, 2007).

Debido a la generación de una microestructura de poros más densa e intrincada la permeabilidad es mucho menor comparada con la de un concreto producido con un cemento portland tradicional. Este refinamiento es especialmente beneficioso para resistir el ingreso de iones cloruro que son los principales causantes de los problemas de durabilidad.

### 1.6.3. Resistencia a la penetración de cloruros

En estudios hechos con cementos LC3 con sustitución del 50% del Clinker con arcillas calcinadas con un contenido de caolinita de 50% o más, la profundidad de penetración de cloruros en un periodo de 2 años ha sido menor a 10 mm. Se han hecho medidas del coeficiente de difusión con métodos acelerados y se encontró que es hasta 10 veces menor que el de un cemento portland ordinario. (Scrivener, Martirena, et al., 2018).

De igual forma se ha determinado que a mayor relación arcilla calcinada: caliza, menor será la profundidad de penetración de iones cloruro. (Scrivener, Avet, et al., 2018)

### 1.6.4. Carbonatación

En cuanto a la tasa de carbonatación como en cualquier cemento adicionado es mayor que la del cemento portland tradicional. La tasa de carbonatación de los LC3 es similar a la de otros cementos adicionados. La tasa de carbonatación depende del contenido de calcio en la pasta de cemento, que a su vez es directamente proporcional al factor Clinker. A menores factores Clinker, menor contenido de calcio y por tanto menor resistencia a la carbonatación. Debido a la disminución del contenido carbonatable la tasa de avance del frente de carbonatación se incrementa. A pesar de la reducción en la permeabilidad debido al refinamiento de la

estructura de poros, la carbonatación está esencialmente controlada por la reserva alcalina de la mezcla.(Shah & Bishnoi, 2018)

### **1.6.5. Reacción álcalis – agregado**

También la presencia de una mayor reserva de álcalis en la solución de poros le confiere una mayor resistencia al ataque de sulfatos y previene casi totalmente la reacción álcalis – agregado. (Favier & Scrivener, 2018). Este comportamiento es esperado no solamente porque la alcalinidad de los LC3 es menor que la de otros cementos, sino que la liberación de alúmina proveniente de la arcilla calcinada en la solución de poros disminuye la disolución de los agregados. (Chappex & Scrivener, 2012)

## **1.7. Propiedades mecánicas de los concretos adicionados con arcilla calcinada y caliza. (LC3)**

### **1.7.1. Resistencia a la compresión**

La resistencia a la compresión de los concretos dosificados con cementos adicionados con arcilla calcinada y caliza con una sustitución de Clinker entre 30 y 50% ha mostrado ser similares a los 28 días a la de un cemento portland ordinario y a la de un cemento adicionado con un 30% de ceniza volante. Pero a edades mayores los LC3 y los adicionados con ceniza volante mostraron un incremento de la resistencia, especialmente los LC3. Este aumento se debe a una reacción puzolánica tardía. Una comparación entre concretos preparados con cementos LC3 y concretos preparados con cementos adicionados con ceniza volante en iguales proporciones y con la misma relación agua-cemento mostró que para todas las edades los LC3 tuvieron mayores resistencias. (Dhandapani et al., 2018b) Esto es claramente un indicador que los concretos preparados con cementos LC3 presentan mayores resistencias a la compresión que los preparados con cemento portland ordinario y los adicionados con ceniza volante ya que con un menor porcentaje de Clinker se obtienen mayores resistencias.

Un factor que mejora grandemente la resistencia es la finura de los granos de Clinker más que la finura de la arcilla calcinada y la caliza. Esto se debe principalmente a que la portlandita controla la hidratación de la arcilla calcinada y la caliza.(Sharma et al., 2021)

Desde el punto de vista de la durabilidad, tradicionalmente se ha supuesto que mayores resistencias implican mayor durabilidad, y las normas implícitamente lo han considerado así, pero esto no es del todo cierto. Un concreto con alta resistencia a la compresión puede ser menos durable que uno de menor resistencia porque la durabilidad depende principalmente de las propiedades de la capa de recubrimiento, la cual en general es muy pequeña comparada con el resto del elemento y por tanto tiene muy poca incidencia en la resistencia total. (Torrent et al., 2022) También se puede encontrar un argumento similar en el Código Modelo 2010.

### 1.7.2. Módulo de elasticidad

En concretos preparados con diferentes tipos de cemento (Portland, LC3, adicionados con cenizas volantes, adicionadas con escoria) se ha encontrado que para todos existe una correlación lineal similar entre la resistencia y el módulo de elasticidad. Esto indica que los LC3 tienen características mecánicas de desempeño similares a las de los otros concretos en diferentes aplicaciones estructurales. Algunos estudios han encontrado que la relación existente entre la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad es similar a la de otros concretos. (Dhandapani et al., 2018a)



## 2. Capítulo 2

### **Metodología: materiales, métodos y ensayos**

#### 2.1. Materiales

La totalidad de los insumos de las mezclas a estudiar por parte de diferentes investigadores en el laboratorio de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, fueron escogidos, caracterizados y dosificados por el Ingeniero Luis Felipe Salazar (Salazar Mayorga, 2023) en una primera etapa de las investigaciones a realizar sobre concretos dosificados con cementos adicionados con arcilla calcinada y caliza LC3. Esta tesis corresponde a una segunda parte de ese proceso en la que se evalúan las propiedades de permeabilidad al aire y durabilidad. Aun cuando la carbonatación está relacionada con la durabilidad, esta tesis no tiene dentro de su alcance el estudio de dicha patología. Una tercera etapa de estas investigaciones está en curso y allí se estudian las propiedades reológicas de las mismas mezclas.

##### 2.1.1. Agregados

###### **Agregado grueso**

Se utilizó una grava con tamaño máximo de una pulgada (1”) obtenida en una planta de una reconocida concretera de la ciudad de Bogotá. No se especifica el origen de esos agregados. Sus propiedades físicas están relacionadas en la Tabla 2-1.

**Tabla 2-1** Propiedades físicas del agregado grueso.

PROPIEDAD	UNIDAD	VALOR	METODO DE ENSAYO	
Masa unitaria suelta	kg / m <sup>3</sup>	1,530	NTC 92	ASTM C29
Masa unitaria compacta	kg / m <sup>3</sup>	1,640	NTC 92	ASTM C29
Humedad evaporable	%	0.40	NTC 1776	ASTM C566
Gravedad específica seco horno	adimens.	2.65	NTC 237	ASTM C128
Gravedad específica SSS	adimens.	2.66	NTC 237	ASTM C128
Gravedad específica aparente	adimens.	2.69	NTC 237	ASTM C128
Absorción	%	0.70	NTC 237	ASTM C128
Contenido de vacíos	%	43.10	NTC 92	ASTM C29

(Salazar Mayorga, 2023).

### Agregado fino

Se utilizó una arena con tamaño máximo de 4.76 mm (3/16”) obtenida en una planta de una reconocida concretera en la ciudad de Bogotá. No se especifica su origen. Sus propiedades físicas están relacionadas en la tabla 2-2

**Tabla 2-2** Propiedades físicas del agregado fino.

PROPIEDAD	UNIDAD	VALOR	METODO DE ENSAYO	
Masa unitaria suelta	kg / m <sup>3</sup>	1,590	NTC 92	ASTM C29
Masa unitaria compacta	kg / m <sup>3</sup>	1,690	NTC 92	ASTM C29
Material pasa tamiz No 200	%	4.50	NTC 78	ASTM C117
Humedad evaporable	%	0.50	NTC 1776	ASTM C566
Gravedad específica seco horno	adimens.	2.49	NTC 237	ASTM C128
Gravedad específica SSS	adimens.	2.51	NTC 237	ASTM C128
Gravedad específica aparente	adimens.	2.54	NTC 237	ASTM C128
Absorción	%	0.70	NTC 237	ASTM C128
Contenido de vacíos	%	36.10	NTC 92	ASTM C29

(Salazar Mayorga, 2023).

### Cemento

Se utilizó un cemento de uso comercial en Colombia de la marca Alión referenciado como de alta resistencia temprana (ART) de acuerdo con la Norma Técnica Colombiana NTC-121 (ASTM C-1157) y sus propiedades físicas se relacionan en la tabla 2-3



**Tabla 2-3** Propiedades físicas del cemento de referencia.

PROPIEDAD	UNIDAD	VALOR	METODO DE ENSAYO	
Densidad	g / cm <sup>3</sup>	3,084	NTC 221	ASTM C188
Módulo de finura	cm <sup>2</sup> / g	4500	NTC 33	ASTM C204
Consistencia normal	%	0,27	NTC 110	ASTM C187
Tiempo de fraguado inicial	min	96,60	NTC 118	ASTM C191
Tiempo de fraguado final	min	210	NTC 118	ASTM C191

(Salazar Mayorga, 2023),

**Arcilla calcinada:**

De origen nacional, **es una caolinita de bajo grado (40%)** calcinada a 850 °C y molida hasta obtener un 100% pasa tamiz No 200 (75 μm). Está principalmente compuesta por silicatos (67%), alúmina (20%) y hierro (8%) que le da su color característico rojizo.

**Yeso:**

De origen nacional. 5% de material retenido sobre tamiz No 325 (45 mm) después de procesos de dihidratado y molido. Sus principales constituyentes son sulfatos (43%) y calcio (32%)

Caliza: de origen nacional con un proceso de molienda. Es un carbonato de calcio natural blanco de alta pureza.

**Tabla 2-4** Propiedades físicas de la caliza, arcilla calcinada y yeso.

PROPIEDAD	UNIDAD	CALIZA	ARCILLA CALCINADA	YESO	METODO DE ENSAYO	
Densidad	g / cm <sup>3</sup>	2,718	2,723	2,311	NTC 221	ASTM C188
Módulo de finura	cm <sup>2</sup> / g	5200	9210	3980	NTC 33	ASTM C204

(Salazar Mayorga, 2023)

**Aditivo:**

Se utilizó Sika viscocrete-2100, un reductor de agua de alto rango, superplastificante con base en policarboxilatos. No contiene cloruros y cumple con norma ASTM C494 tipos A y F. Efecto reductor de agua de 10% a 15% para dosis de 0.15% de la masa del cemento y una reducción de 45% del agua para dosis de 0.40% de la masa del cemento.

**Agua:**

agua potable de la red de acueducto de Bogotá.

## 2.2. Mezclas

**Tabla 2-5** Proporciones porcentuales en masa de mezclas de cemento de referencia (MR) y mezclas adicionadas en proporciones AC : CA

MEZCLA / IDENTIFICACION		CEMENTO PORTLAND %	ARCILLA CALCINADA (AC) %	CALIZA (CA) %	PROPORCION AC: CA
1	MR	MR	100		
2	C10 - A10	M01	80	10	1 : 1
3	C10 - A20	M02	70	20	2 : 1
4	C10 - A30	M03	60	30	3 : 1
5	C15 - A30	M04	55	30	2 : 1
6	C20 - A30	M05	50	30	3 : 2

(Salazar Mayorga, 2023).

Las mezclas se identifican por el nombre entre paréntesis, entendiéndose que MR corresponde a la mezcla de referencia y las demás mezclas M01 a M05 corresponden a las mezclas dosificadas en las proporciones de arcilla calcinada a calizas especificadas en la tabla 2-5.

**Tabla 2-6** Proporciones porcentuales finales en masa de materias primas por mezcla

MEZCLA	CEMENTO %	ARCILLA CALCINADA %	CALIZA %	YESO %	TOTAL %
MR	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00
M01	85,28	10,00	1,79	2,93	100,00
M02	74,53	20,00	2,82	2,65	100,00
M03	62,38	30,00	3,99	3,63	100,00
M04	57,41	30,00	9,47	3,12	100,00
M05	51,68	30,00	15,02	3,30	100,00

(Salazar Mayorga, 2023).

En la formulación de los cementos para obtener las proporciones de las mezclas se tuvo en cuenta que el cemento de referencia presenta un contenido de caliza y yeso. Los resultados se presentan en la tabla 2-6.

### 2.2.1. Determinación del contenido de humedad de los agregados

El contenido de humedad de los agregados grueso y fino se determinó de acuerdo con la norma NTC- 1776.(ICONTEC, 1994) . Los agregados se saturaron 24 horas antes de tomar los pesos y se dejaron aislados en recipientes plásticos de forma que no perdieran humedad. Posteriormente se tomaron muestras de cada uno de los agregados, se pesaron en la condición saturados y secos superficialmente. Se sometieron a secado en estufa eléctrica como se aprecia en la Figura 2-1 y posteriormente se hizo lectura del peso seco. Con estos resultados se evaluaron las humedades de los agregados y se determinaron las cantidades totales necesarias para la elaboración de las probetas.

Figura 2-1 Secado de muestras de los agregados grueso y fino.



Fuente: propia.

### 2.2.2. Dosificación y preparación materiales para fundir mezclas

Con los datos de contenido de humedad de los agregados se determina la cantidad de materiales necesarios (cemento, arcilla calcinada, caliza, yeso, agua, grava y arena) para el volumen de concreto requerido para el total de probetas de cada muestra, de acuerdo con las proporciones de los diseños de mezclas suministrados por el Ingeniero Luis Felipe Salazar y consignados en las Tablas 2-7, 2-8 y 2-9.

Tabla 2-7 Cantidades de agregados y agua para cada mezcla

MEZCLA	CANTIDAD A PREPARAR litros	AGREGADOS		AGUA gramos	PESO DEL AGUA EN LA		PESO TOTAL DEL AGUA
		GRAVILLA	ARENA		GRAVILLA	ARENA	
		gramos	gramos				
MR	34	29438	28620	5556	275.1	1700.8	7531.9
M01	34	29438	28620	5556	275.1	1700.8	7531.9
M02	35	30384	30036	5038	377.7	2338.2	7753.9
M03	35	30376	30028	5038	377.6	2337.6	7753.2
M04	35	30722	30122	4614	715.9	2423.3	7753.2
M05	35	30720	30118	4614	715.8	2423.0	7752.8

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 2-8** Cantidades de cemento ART, adiciones y aditivo para cada mezcla.

MEZCLA	CANTIDAD A PREPARAR litros	CEMENTO MAS ADICIONES					
		CEMENTO	ARCILLA	CALIZA	YESO	ADITIVO	CEMENTO +
		gramos	gramos	gramos	gramos	gramos	ADICIONES
MR	34	14280	0	0	0.0	0.0	14280.0
M01	34	12180	1428	255	418.2	0.0	14281.4
M02	35	10956	2940	415	389.2	0.0	14700.2
M03	35	9170	4410	587	533.2	17.6	14717.8
M04	35	8440	4410	1394	460.0	29.0	14733.0
M05	35	7598	4410	2210	486.0	37.0	14741.0

(Salazar Mayorga, 2023).

**Tabla 2-9** Peso total materiales por mezcla y slump real medido.

MEZCLA	CANTIDAD A PREPARAR litros	PESO TOTAL MEZCLA gramos	SLUMP MEDIDO
MR	34	77894.0	8-1/2"
M01	34	77895.4	8-3/8"
M02	35	80158.2	6-3/4"
M03	35	80159.8	5-1/8"
M04	35	80191.0	1-3/4"
M05	35	80193.0	7- 5/8"

Fuente: elaboración propia.

### 2.2.3. Mezclado y fundida

Las mezclas fueron mezcladas y fundidas en el laboratorio de la Universidad Nacional de Colombia en una mezcladora eléctrica con una capacidad de un bulto. Para la obtención de las probetas fue necesario fundir 8 cilindros en moldes plásticos de 4x8 pulgadas y 3 cilindros en moldes metálicos de 6x12” como se aprecia en las Figuras siguientes. Como un indicador de la manejabilidad de cada una de las mezclas se midió el asentamiento en cono de Abrams

**Figura 2-2** Llenado de moldes y compactado de la mezcla mediante varillado



Llenado de moldes plásticos cilíndricos (camisas) de 104 mm de diámetro y 200 mm de altura.

Fuente: propia.

**Figura 2-3** Asentamiento mezcla de referencia MR (8-1/2") y mezcla M01 (8-3/8").



Nótese el cambio de color de las mezclas debido a la presencia de arcilla. Fuente: propia.

**Figura 2-4** Asentamiento mezclas M02 (6-3/4") y M03 (5-1/8").



Incremento del color rojo de las mezclas y pérdida de manejabilidad. Fuente: propia.

**Figura 2-5** Asentamiento mezclas M04 (1-3/4") y M05 (7-5/8").



La mezcla M04 presenta un asentamiento mínimo y para la mezcla M05 fue necesario utilizar aditivo plastificante sika © visocrete © 2100. Fuente: propia .

Nótese la pérdida de fluidez (asentamiento) de las mezclas en la medida que aumentan las proporciones de arcilla calcinada y caliza. En la Figura 2-5 la mezcla M05 tiene la dosificación máxima de aditivo del diseño más 5 ml. Con la dosis máxima la mezcla no tenía una mejora en la durabilidad, pero con un pequeño incremento de 5 ml la mezcla cambió drásticamente su consistencia tal como se aprecia en la imagen.



## 2.2.4. Curado

Una vez fundidos los cilindros se dejaron en reposo por 24 horas y después de ese tiempo se desmoldaron y sumergieron en agua en el tanque del laboratorio. En las imágenes se puede apreciar una ligera capa de cal adicionada durante el proceso de curado.

Figura 2-6 Curado al agua de las muestras



Mezclas elaboradas y curadas de acuerdo con NTC-1377 (ASTM C-192). Fuente: propia.

Todas las muestras permanecieron sumergidas en agua a temperatura constante como se muestra en la Figura 2-6. Fueron sacadas en el mismo orden que se fundieron. Las mezclas MR y M01 a los 56 días, las mezclas M02 y M03 a los 58 días y las mezclas M04 y M05 a los 60 días. Se dejaron en agua tres (3) cilindros de 4x8" de cada mezcla para los ensayos de resistencia y módulo de elasticidad y permanecieron sumergidas durante 98 días.

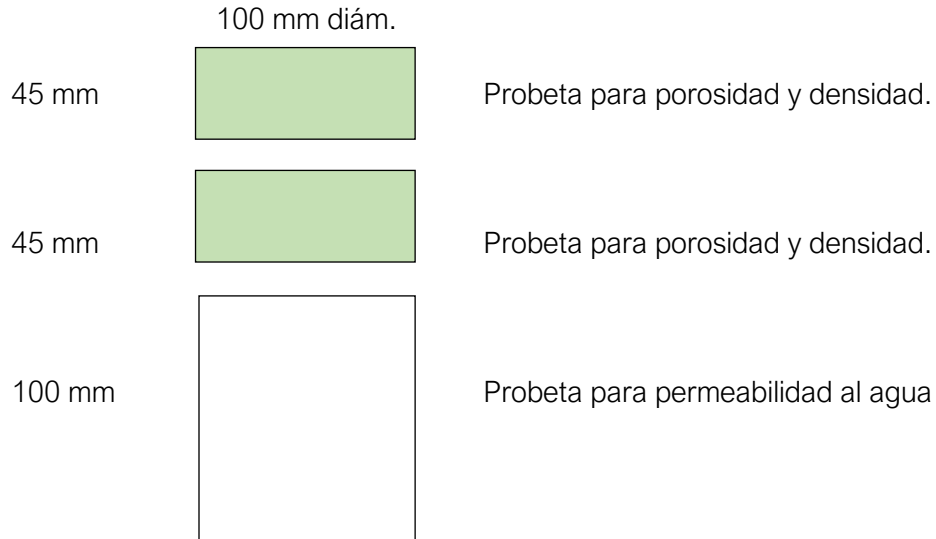
## 2.2.5. Preparación probetas

### CORTE

Las probetas fueron aserradas de cilindros de 100 mm de diámetro por 200 mm de longitud de acuerdo con el esquema de la Figura 2-7. De cada mezcla se prepararon dos (2) probetas para un total de 12 probetas.



**Figura 2-7** Corte de muestras de un cilindro de 100 mm diámetro 200 mm altura  
 2 probetas para la mezcla de referencia MR.  
 2 probetas para cada una de las cinco mezclas M01 a M05



En cada cilindro se identifican los ensayos a realizar en las probetas. Fuente: propia.

**Figura 2-8** Muestras identificadas, marcadas y cortadas con disco diamantado



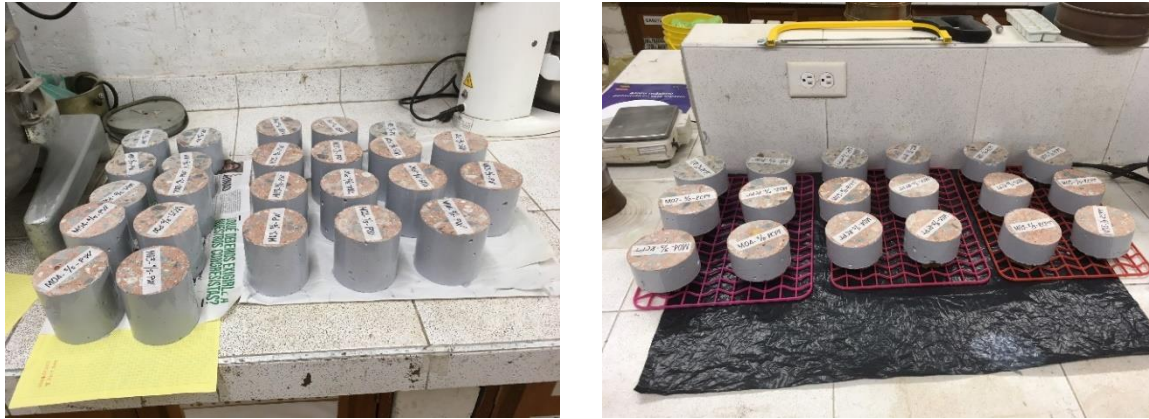
Marcado y corte por aserrado de las probetas. Fuente: propia.

Una vez cortadas se cepillaron y lavaron las caras aserradas de forma que quedarán totalmente libres de lodo y se almacenaron a temperatura y humedad lo más estable posible como se aprecia en la Figura 2-8.

## Pintado

Se aplicaron dos capas de pintura epóxica perimetralmente sobre las probetas de permeabilidad, electro impedancia y NT-492. Las muestras de SPT se pintaron perimetralmente más una de sus caras. Todas las demás muestras no requieren pintado. Ver Figura 2-9.

Figura 2-9 Pintado muestras para ensayos de permeabilidad al agua y NT-492



Aplicación de dos capas aislantes de pintura epóxica. Fuente: propia.

## 2.3. Ensayos

### 2.3.1. Porosidad

Figura 2-10 Secado de muestras para evaluación de porosidad y densidad



Temperatura 50 °C durante 72 horas. Fuente: propia.

Las probetas se secaron en el horno a una temperatura constante de 50 °C durante 72 horas como se aprecia en la Figura 2-10, para garantizar que la variación en el peso en dos medidas consecutivas hechas con intervalos de 24 horas fuera menor al 0,5%. Se retiraron del horno y se dejaron reposar dentro de una caja de cartón por un periodo de tres horas tratando de mantenerlas en un ambiente libre de humedad y luego se tomaron los pesos secos (Wseco). Posteriormente se llevaron a una cámara de vacío donde permanecieron tres (3) horas a una presión absoluta aproximada de 515 mm Hg (50 mm de Hg por debajo de la presión del laboratorio) con la bomba de vacío en funcionamiento. Transcurrido ese tiempo y con la bomba en funcionamiento se llenó la cámara de vacío con agua potable (previamente acondicionada mediante hervido y reposo hasta alcanzar temperatura ambiente). Esta condición se mantuvo durante una hora más. Se apaga la bomba de vacío y las probetas permanecieron bajo esa condición durante 18 horas.

Figura 2-11 Saturación de muestras.



Bomba y cámara de vacío. Muestras en cámara de vacío. Fuente: propia.

Figura 2-12 Hervido de agua potable y saturación de probetas



Fuente: propia.

**Figura 2-13** Lectura de la presión mediante Vacuómetro digital.



Presión absoluta ambiental (565.4 mm Hg) y dentro de la cámara de vacío (515.5 mm Hg).  
Fuente: propia.

**Figura 2-14** Lectura de la presión interna de la cámara de vacío mediante vacuómetro analógico.



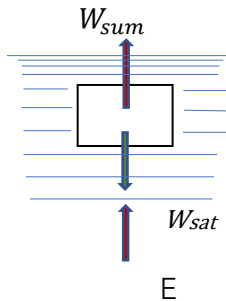
Vacuómetro integrado a la bomba de vacío. Lectura en pulgadas de Hg. Fuente: propia.

Al finalizar el proceso las probetas se pesaron bajo la condición saturadas y secas superficialmente ( $W_{sat}$ ). Luego se sumergieron las probetas en un depósito con agua y se tomaron los pesos sumergidos ( $W_{sum}$ ).



La porosidad se determinó mediante la siguiente ecuación

$$(porosidad) p = \frac{Vol_{vacíos}}{Vol_{total}} * 100$$



$$(Empuje) E = Vol_{total} * \gamma_{agua}$$

$$Vol_{total} = \frac{E}{\gamma_{agua}}$$

$$W_{sum} = W_{sat} - E$$

$$E = W_{sat} - W_{sum}$$

$$\gamma_{agua} = 1.0 \text{ gr/cm}^3$$

$$Vol_{total} = \frac{W_{sat} - W_{sum}}{\gamma_{agua}}$$

$$W_{agua} = Vol_{agua} * \gamma_{agua} \quad Vol_{agua} = \frac{W_{agua}}{\gamma_{agua}}$$

$$W_{agua} = W_{sat} - W_{seco} \quad Vol_{vacíos} = Vol_{agua} \quad Vol_{vacíos} = \frac{W_{sat} - W_{seco}}{\gamma_{agua}}$$

Entonces:

$$densidad (d) = \frac{W_{sat} - W_{seco}}{W_{sat} - W_{sum}}$$

$$porosidad (p) = \frac{W_{sat} - W_{seco}}{W_{sat} - W_{sum}}$$

### 2.3.2. Módulo de elasticidad ( E )

El ensayo se realizó de acuerdo con NTC-4025 sobre cilindros de 4x8" fundidos y curados en agua de acuerdo con NTC-1377 durante un período de 98 días. Los cilindros no fueron refrentados con azufre. Las probetas se montaron sobre discos de neopreno y ensayadas en el laboratorio de la Universidad Nacional en la máquina de prueba universal Shimadzu AG-X plus de 300 kN, la cual es servocontrolada por velocidad, con un desplazamiento del cabezal de 0.5 mm/min. En las Figura 2-15 y Figura 2-16 se aprecia la probeta con un extensómetro circunferencial y un compresómetro longitudinal lista para ser ensayada.

Para el ensayo de evaluación del módulo de elasticidad, previamente se llevó una probeta de cada mezcla hasta la carga de rotura (f'c) en el equipo prensa automax del laboratorio de la Universidad Nacional. Se tomó el 40% de ese resultado como base para determinar la carga

máxima a aplicar para determinar el módulo de elasticidad sobre las otras dos probetas de cada mezcla. Se obtuvieron dos resultados para evaluar el módulo de elasticidad y se tomó el promedio como el valor de éste.

**Figura 2-15** Acondicionamiento de probeta para evaluación del módulo de elasticidad.



Extensómetro circunferencial para medir deformaciones transversales. Fuente: propia

**Figura 2-16** Instrumentación de muestra para evaluación del módulo de elasticidad.



Probeta con compresómetros longitudinal y extensómetro circunferencial bajo el cabezal en máquina de prueba universal. Fuente: propia.

### 2.3.3. Resistencia a la compresión ( $f'_c$ )

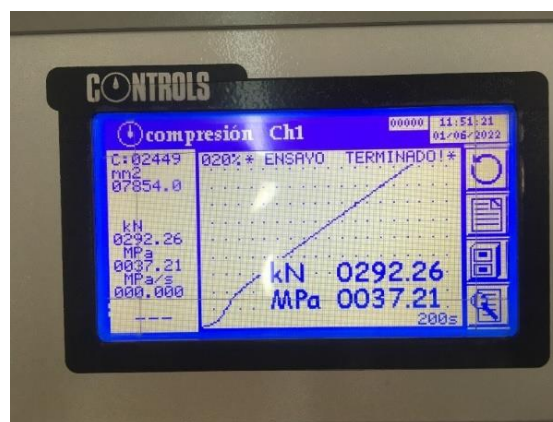
Las probetas para este ensayo fueron mezcladas, fundidas y curadas de acuerdo con lo establecido en NTC-1377. Fueron llevada a la falla en la prensa automax del laboratorio de la Universidad Nacional (Figura 2-17) y se llevó hasta la carga de rotura para determinar la resistencia a la compresión  $f'_c$  (Figura 2-18). Las probetas no fueron refrentadas y en su lugar se utilizaron almohadillas de neopreno contenidas en el fondo de un anillo de acero que sirve de confinamiento y guía.

Figura 2-17 Montaje y rotura de probeta en ensayo de resistencia a la compresión



Cilindro antes y después de la falla por compresión axial. Fuente: propia.

Figura 2-18 Ensayo de resistencia a la compresión.



Display prensa Automax mostrando carga de rotura en kN y resistencia a la compresión  $f'_c$  en Mpa. Fuente: propia.

### 2.3.4. Permeabilidad al agua

De acuerdo con la norma NTC-4483 el coeficiente de permeabilidad al agua (K) se puede determinar en el laboratorio por dos métodos:

- ❖ Flujo constante: para concretos de alta permeabilidad.
- ❖ Profundidad de penetración.

Los ensayos de permeabilidad al agua se realizaron sobre probetas obtenidas a partir de aserrado de discos de 75 mm de altura de cilindros de 4x8" curados durante 58 días. Una vez cortadas se limpiaron mediante cepillado con cepillo de acero y lavaron con abundante agua para remover residuos que pudieran alterar el ensayo. Posteriormente las probetas fueron pintadas con dos capas de pintura epóxica en todo su perímetro y en las caras libres se aplicó la misma pintura sobre un anillo de aproximadamente un 1 cm de ancho, sobre el cual sienta el empaque de caucho. Ver Figura 2-19.

Figura 2-19 Alistado probetas para evaluación de la permeabilidad al agua.



Probetas cortadas, lavadas y pintadas. Tamaño 100 mm diámetro 75 mm altura.

Fuente: propia.



Figura 2-20 Ensayo de permeabilidad al agua

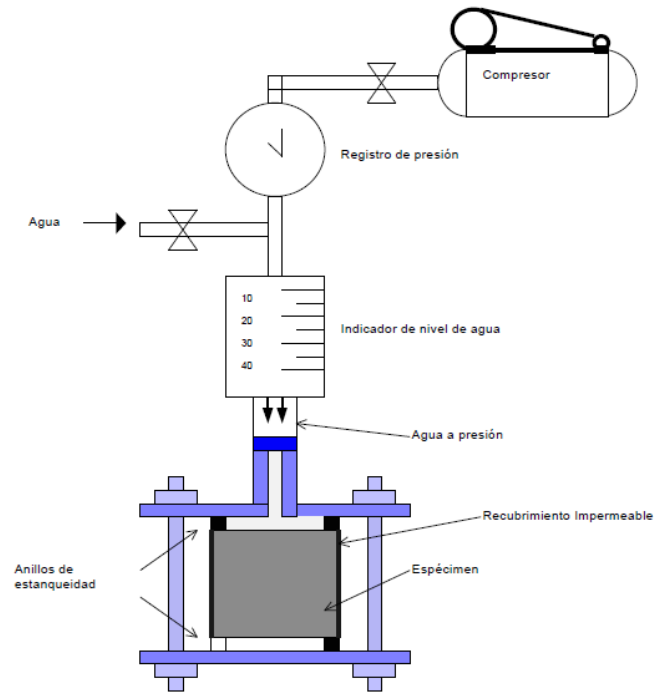


Diagrama montaje probeta según NTC-4483. (ICONTEC, 1998).

Figura 2-21 Montaje de probetas para ensayo de permeabilidad al agua



Presión sobre las probetas de 0.5 MPa (5.0 kg/cm<sup>2</sup>). Fuente: propia.

El dispositivo sobre el cual se monta la probeta de acuerdo con el diagrama mostrado en la Figura 2-20 consta de dos discos de acero, sujetos entre sí con cinco (5) pernos 1/4" de diámetro y aproximadamente 20 cm de largo. El disco superior tiene un acople en el centro

en donde se ajusta la manguera de entrada del agua al sistema y una válvula de purga para evacuar el aire contenido antes de iniciar el ensayo y garantizar que en el sistema sólo hay agua. El disco inferior presenta un agujero central de aproximadamente 1/8" de diámetro por donde sale el agua que ha permeado la probeta. Ver Figura 2-21.

Antes de colocar las muestras entre los discos se les coloca en cada extremo un anillo de caucho que cumplen tres funciones básicas:

1. ajustar y centrar la muestra en los discos de acero.
2. servir de sello
3. direccionar el flujo de agua de forma que sea lo más paralelo al eje longitudinal de la probeta.

La probeta se debe montar de forma que la dirección del flujo de agua sea la misma con la que se fundió el cilindro. Una vez montada la probeta entre los discos extremos se procede a ajustar los pernos de forma que la presión que los anillos de caucho hacen sobre la muestra sea lo más uniforme posible. Para ello se procede a apretar los pernos de manera alterna.

El banco de trabajo tiene capacidad para montar hasta ocho (8) probetas simultáneamente. Cada uno de los puestos tiene un registro de corte que permite aislar la probeta en caso de ser necesario. Antes de introducir la presión al sistema se cierran todos los registros de corte y se enciende el equipo, Se introduce una presión de 0.5 MPa y se purgan una a una todas las probetas abriendo primero el registro de corte y luego brevemente la respectiva válvula de purga para que salga el aire contenido. Se verifica que no se presenten goteos. En caso de presentarse se deben ajustar los pernos hasta que cese la fuga. Este procedimiento se hace todas las probetas. Finalizado el purgado y sellado de goteos, si los hay, de todas las probetas se calibra nuevamente la presión en 0.5 MPa. Se apaga el equipo y se da inicio al ensayo.

Bajo cada probeta se coloca un recipiente con el fin de medir el volumen de agua permeada en caso de que se establezca un flujo y de acuerdo con el método de flujo constante, se hacen mediciones constantes hasta que se establezca un flujo constante. En caso de que transcurridas las 96 horas no se haya establecido un flujo de agua, se da por terminado el proceso y se desmontan las probetas cerrando primero los registros de corte y después retirando la manguera de presión del acople. Se aflojan los pernos y se retiran las probetas.

Figura 2-22 Partido probeta para permeabilidad al agua.



Fuente: propia.

Para medir la profundidad de penetración del agua se parte la probeta en dos mitades mediante un ensayo de tracción indirecta (NTC-722) y se toman por lo menos cinco (5) lecturas. Una cada dos (2) cm iniciando a una distancia de 1.0 cm del borde. La profundidad de penetración será el promedio de las lecturas. Ver Figura 2-22.

El valor del coeficiente K se calcula así:

❖ Método de flujo constante:

$$K = \frac{\rho L g Q}{P A}$$

Donde K = coeficiente de permeabilidad en m/s

$\rho$  = densidad del agua en kg/m<sup>3</sup>

L = longitud del espécimen en m

g = aceleración de la gravedad en m/s<sup>2</sup>

Q = caudal de agua en m<sup>3</sup>/s

P = presión del agua en N/m<sup>2</sup>

A = área transversal del espécimen en m<sup>2</sup>

❖ Profundidad de penetración

$$K = \frac{D^2 v}{2 T h}$$

Donde K = coeficiente de permeabilidad en m/s

D = profundidad de penetración en m

T = tiempo para penetrar la distancia D en s

h = cabeza de presión en m

$\nu$  = porosidad del concreto determinada según ASTM C-642.

El tipo de permeabilidad al agua de cada mezcla se califica de acuerdo con la tabla mostrada en la Figura 2-23.

**Figura 2-23** Relación de la permeabilidad del concreto con el coeficiente de permeabilidad y la profundidad de penetración

Determinación	Undidades	Permeabilidad		
		Baja	Media	Alta
Coeficiente de permeabilidad al agua	m/s	< 10 <sup>-12</sup>	10 <sup>-12</sup> a 10 <sup>-10</sup>	> 10 <sup>-10</sup>
Profundidad de penetración	mm	< 30	30 a 60	> 60

TABLA XXX. Relación de la permeabilidad del concreto con el coeficiente de permeabilidad y la profundidad de penetración

Tomado de NTC-4483.(ICONTEC, 1998).

### 2.3.5. Permeabilidad al aire

El ensayo de permeabilidad al aire se realizó sobre probetas cilíndricas de hormigón de 15 cm de diámetro por 10 cm de alto, cortadas de cilindros de 6x12” fundidos en el laboratorio. Los cilindros tenían 58 días de curado en agua. El corte se hizo con disco diamantado de forma que la probeta tuviera las dos caras aserradas. Una vez cortadas las probetas se lavaron con abundante agua y cepillo metálico para eliminar todos los residuos que pudieran alterar los resultados.

Las probetas fueron secadas a 50 °C durante tres días y luego se les permitió enfriar hasta la temperatura medio ambiente del laboratorio. Una vez listas las probetas se procedió a hacer lecturas en ambas caras.

Las lecturas del coeficiente de permeabilidad al aire (kT) se hicieron en el laboratorio de acuerdo a lo establecido en la norma suiza SIA-262/1:2019.

El permeaTORR (Figura 2-24), es un equipo para medir el coeficiente de permeabilidad al aire (kT) bien sea en el laboratorio sobre muestras preparadas o sobre muestras extraídas de una estructura en particular o bien puede medirse directamente en terreno. La gran ventaja de este método es que no es invasivo ni destructivo y permite obtener resultados en un tiempo aproximado de 6 minutos. Este método evalúa la permeabilidad al aire del recubrimiento del elemento de concreto, que realmente la capa que está en contacto directo con los agentes agresores.

**Figura 2-24** Permeabilímetro permeaTORR AC- v.3.0



Imagen tomada de (Material Advanced Services, 2015)

El equipo básicamente consiste en una celda de vacío conectada a una unidad central de control. La celda de vacío está formada por dos cámaras concéntricas, llamadas interior y exterior, que se apoyan sobre la superficie a ensayar mediante unos anillos de caucho que sellan el paso de aire una vez la bomba se enciende y hacen que la celda se adhiera a la superficie. Ver Figura 2-26.

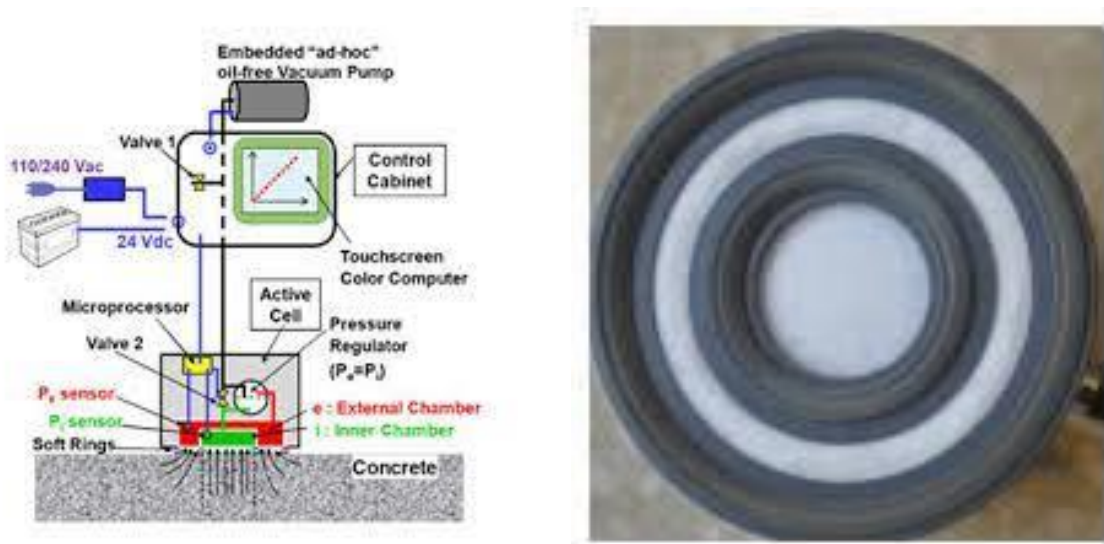
Figura 2-25 Equipo permeaTORR y celda de vacío listos para inicio de lectura



Fuente: propia.

La presión en las dos cámaras debe balancearse para garantizar que el flujo de aire entre los poros y la cámara interior esté controlado y sea unidireccional.

Figura 2-26 Esquema de funcionamiento del equipo permeaTORR.



A la derecha se aprecian las cámaras interior y exterior de vacío. Fuente: Imagen tomada de (Material Advanced Services, 2015).

Antes de realizar cualquier lectura se debe acondicionar el equipo colocando la celda de vacío sobre la placa de calibración (Figura 2-25). Este proceso demora 20 minutos. Luego del acondicionado se hacen dos calibraciones seguidas del equipo. El aumento máximo de



presión registrado después de la segunda calibración debe ser menor a 5.0 mbar y no puede diferir en más de 0.5 mbar al registrado en la primera calibración. En caso de que no se cumplan estas dos condiciones se deben hacer calibraciones adicionales hasta que se cumplan estos requisitos. Todo este procedimiento puede durar como mínimo 45 minutos dependiendo si es necesario o hacer más de dos calibraciones. Ver Figura 2-27.

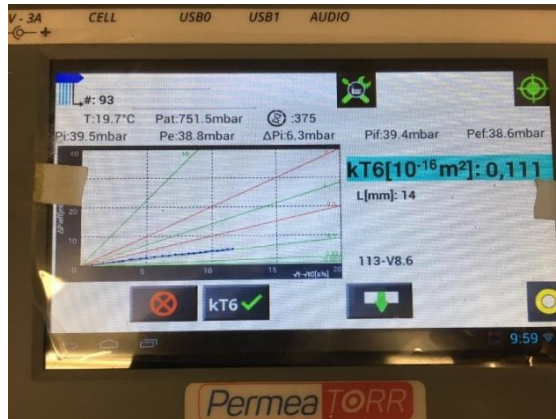
**Figura 2-27** Proceso de calibración permeaTORR.



En la imagen de la derecha se aprecia que el máximo incremento de presión es menor a 5.0 mbar y las lecturas difieren en menos de 0.5 mbar. Fuente: propia.

Con el equipo acondicionado y calibrado se procede al ensayo. La superficie de la probeta debe estar limpia y lo más plana posible de forma que facilite el total contacto de los anillos de la unidad de vacío para que ésta se adhiera firmemente. Se coloca la celda de vacío sobre la probeta y se espera a que la unidad solicite conectar la celda de vacío. Se oprime el botón de inicio ubicado en la celda y se sujeta ésta firmemente sobre la probeta hasta que haya total adherencia. En caso de no adherirse la unidad emite una señal audible mientras no cambie esta condición. La unidad de control da inicio y registra en la pantalla del equipo el valor del coeficiente de permeabilidad al aire  $kT$  y la profundidad de penetración  $L$  en mm y graba en su memoria el número de ensayo, la fecha, el resultado y la profundidad de penetración estimada. Ver Figura 2-28.

Figura 2-28 Resultado del ensayo de permeabilidad al aire.



Pantalla al final del ensayo mostrando lectura del coeficiente permeabilidad al aire kT6 y profundidad de penetración L en mm. Fuente: propia.

### 2.3.6. NORDTEST BUILD 492 (NT BUILD – 492)

Este ensayo se realiza para determinar el coeficiente de migración de cloruros en el concreto. El coeficiente de migración determinado es una medida de la resistencia del concreto a la penetración de cloruros. De acuerdo con lo establecido en la norma NT BUILD-492, el resultado obtenido no puede compararse directamente con el coeficiente de difusión de cloruros obtenido con otro método. Este ensayo está definido como un método alternativo al ensayo ASTM C-1202. El coeficiente de difusión de cloruros puede utilizarse para predecir la vida útil de un concreto o para diseñar un concreto más durable.

Las probetas utilizadas tienen 100 mm de diámetro por 50 mm de espesor y fueron cortadas con disco diamantado de cilindros de 4x8" fundidos en el laboratorio y curados en agua durante 58 días. Una vez cortadas, se lavaron con abundante agua y cepillo de acero para retirar todos los residuos que pudieran alterar el resultado del ensayo. Ver Figura 2-29.



**Figura 2-29** Marcado y corte de muestras para NT-492 y otros ensayos



Fuente: propia.

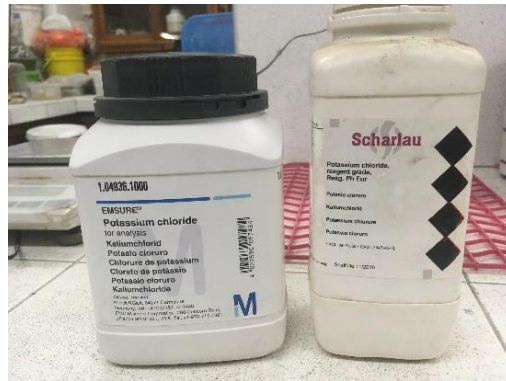
Una vez lavadas y superficialmente secas las muestras se llevan a una cámara de vacío para ser saturadas. Las muestras deben quedar ubicadas de tal manera que sus dos caras queden expuestas. Se reduce la presión absoluta en la cámara de vacío en 50 mm Hg respecto a la presión atmosférica medida en el laboratorio (565 mm Hg). Se sostiene esta presión con la bomba de vacío encendida durante tres horas. Transcurrido ese tiempo se cubren las probetas con una solución saturada de agua destilada y  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  preparada previamente. Se mantiene la presión con la bomba de vacío encendida durante una hora más. Al finalizar ese tiempo se apaga la bomba y se dejan las probetas bajo la presión de la cámara durante 18 +/- 2 horas. El procedimiento es similar al de saturado de las probetas para el ensayo de porosidad.

### **soluciones anolíticas y catolíticas**

Se prepara la solución anolítica con una concentración 0.3 N de NaOH disuelto en agua destilada (12 gramos de NaOH disueltos en un litro de agua). La pureza del NaOH granular utilizado es de 99.2% certificada. Ver Figura 2-30.

La solución catolítica con una concentración 2N correspondiente a un 10% de Na Cl en masa disuelta en agua potable (100 gr de NaCl disueltos en 900 gr de agua). Se utilizó NaCl con una pureza certificada del 99.9%.

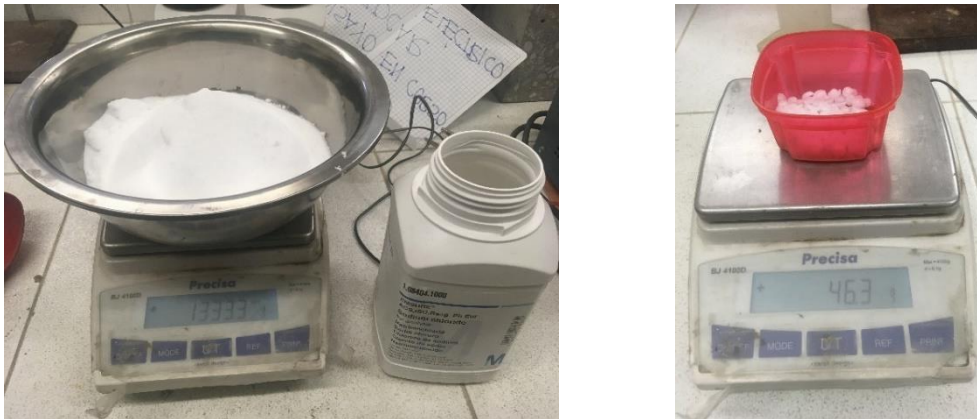
Figura 2-30 NaCl y NaOH debidamente certificados para prueba NT BUILD -492



La pureza del NaCl es del 99.9% y del NaOH granulado es de 99.2%.

Fuente: propia

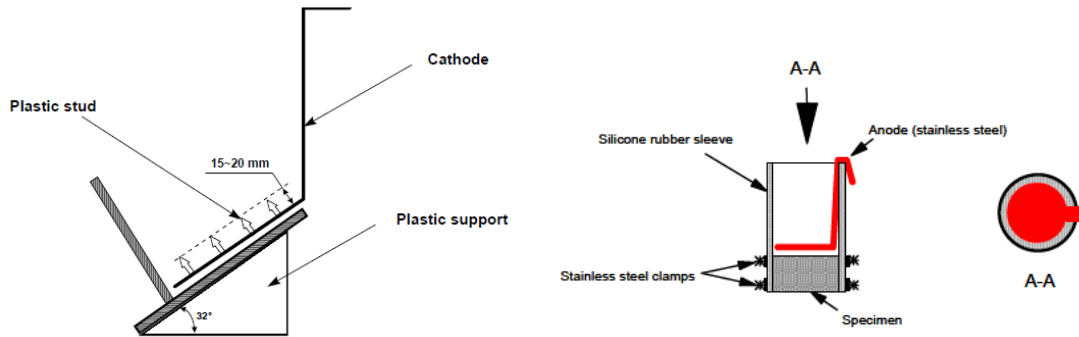
Figura 2-31 Pesado componentes solución catódica y anódica prueba NT BUILD -492



Fuente: propia.

Se introduce la probeta en una manga de caucho dejándola salida entre 2 y 3 mm para facilitar el contacto con el cátodo como se aprecia en la Figura 2-33. Se coloca sobre la base plástica ubicada en el recipiente con la solución catódica de acuerdo al diagrama mostrado en la Figura 2-32.

**Figura 2-32** Disposición de la base plástica y ubicación de la probeta y los electrodos para ensayo NT BUILD 492



Fuente: Imagen tomada de (Nordtest, 1999).

**Figura 2-33** Montaje probeta en manga de caucho y colocación en solución catódica



Fuente: propia.

Se llena un recipiente con 12 litros de solución catódica y se sumerge la probeta colocando en su base un electrodo de acero inoxidable haciendo contacto con toda la base de la probeta y que va conectado al polo negativo de la fuente.

Se adicionan 300 ml de la solución anódica dentro de la manga y se introduce un electrodo de acero inoxidable que hace contacto con toda la superficie de la probeta y se conecta al polo positivo de la fuente.

Figura 2-34 Montaje probeta, electrodos, fuente e inicio ensayo NT BUILD 492..



Nótese la calibración del voltaje mediante multímetro externo. Fuente: propia.

Una vez montada la probeta y verificadas las conexiones se enciende la fuente con un voltaje preestablecido de 30 V como se aprecia en la Figura 2-34 y se registra la corriente inicial. Si se requiere se hacen los ajustes necesarios para que el voltaje sea el especificado. Se registra adicionalmente la temperatura de la solución anolítica. Con el valor de la corriente inicial se determina el valor del voltaje a ser aplicado y la duración del ensayo de acuerdo con la tabla de referencia del NT BUIL 492 mostrada en la Figura 2-35.

Puesto que de cada mezcla se ensayan tres probetas, estas se conectan a la fuente en paralelo tal como se ve en la Figura 2-36

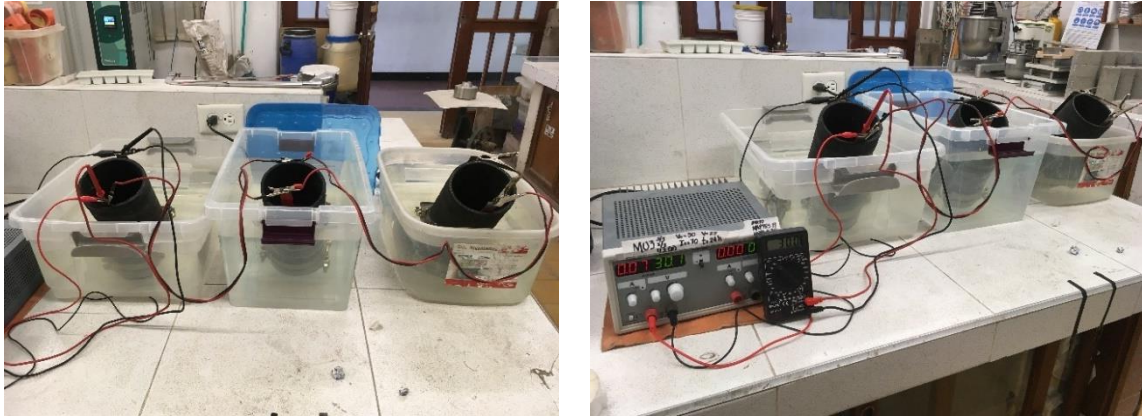
Figura 2-35 Tabla de voltajes a aplicar y duración del ensayo según voltaje inicial.

Initial current $I_{30V}$ (with 30 V) (mA)	Applied voltage $U$ (after adjustment) (V)	Possible new initial current $I_0$ (mA)	Test duration $t$ (hour)
$I_0 < 5$	60	$I_0 < 10$	96
$5 \leq I_0 < 10$	60	$10 \leq I_0 < 20$	48
$10 \leq I_0 < 15$	60	$20 \leq I_0 < 30$	24
$15 \leq I_0 < 20$	50	$25 \leq I_0 < 35$	24
$20 \leq I_0 < 30$	40	$25 \leq I_0 < 40$	24
$30 \leq I_0 < 40$	35	$35 \leq I_0 < 50$	24
$40 \leq I_0 < 60$	30	$40 \leq I_0 < 60$	24
$60 \leq I_0 < 90$	25	$50 \leq I_0 < 75$	24
$90 \leq I_0 < 120$	20	$60 \leq I_0 < 80$	24
$120 \leq I_0 < 180$	15	$60 \leq I_0 < 90$	24
$180 \leq I_0 < 360$	10	$60 \leq I_0 < 120$	24
$I_0 \geq 360$	10	$I_0 \geq 120$	6

Fuente: Imagen tomada de (Nordtest, 1999).



**Figura 2-36** Montaje en paralelo de tres probetas de la misma mezcla.



Fuente: propia.

Una vez finalizado el ensayo se apaga la fuente y se desmonta la probeta siguiendo el procedimiento inverso al del montaje. Se lava la muestra con agua potable, se seca superficialmente y se divide en dos mitades a lo largo del eje longitudinal mediante un ensayo de tracción indirecta. Se escoge la mitad que presente el corte lo más perpendicular posible a la cara de la probeta. Se rocía una solución de nitrato de plata 0.1 M sobre la superficie fracturada y se espera a que sea visible la precipitación de la solución. Esto puede demorar entre 10 y 20 minutos. Ver Figura 2-37.

**Figura 2-37** Frente de precipitación del nitrato de plata en ensayo NT BUILD-492.



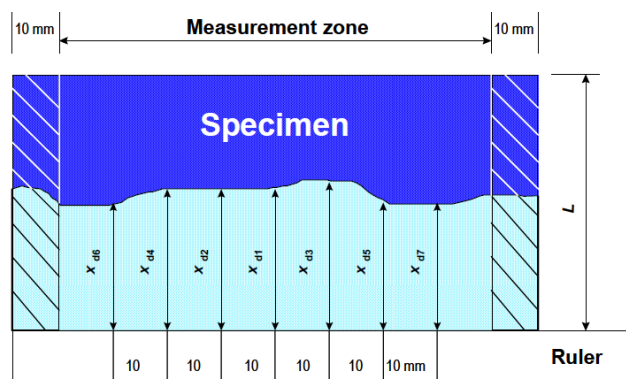
Nótese la reacción del nitrato de plata como marcador de la profundidad de penetración

Fuente: propia.

Se debe tener cuidado extremo con el manejo del nitrato de plata ya que es una sustancia altamente tóxica. Se debe utilizar guantes de nitrilo y/o caucho, tapabocas N95, gafas de protección o preferiblemente careta. Para el rociado debe hacerse ojalá dentro de una caja de cartón que contenga el rocío que pueda dispersarse en el aire.

Se procede a hacer las lecturas del frente de avance teniendo en cuenta las exigencias de la norma NT BUID 492, de acuerdo con el diagrama mostrado en la Figura 2-38.

**Figura 2-38** Ilustración de la forma de medir la profundidad de penetración de cloruros.



Fuente: Imagen tomada de (Nordtest, 1999).

La norma NT BUILD 492 establece el procedimiento para determinar el valor del coeficiente de migración en condición no estacionario y hace algunas simplificaciones quedando finalmente así:

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \left( x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)L x_d}{U - 2}} \right)$$

En donde

$D_{nssm}$  = coeficiente de migración en condición no estacionaria,  $\times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s

U = valor absoluto del voltaje aplicado, V.

T = valor promedio de la temperatura inicial y final en la solución analítica. °C

L = espesor de la probeta. Mm

$x_d$  = valor promedio de la profundidad de penetración

T = duración del ensayo en horas.

### 2.3.7. Ensayo de estancamiento de sal (Salt ponding test - SPT)

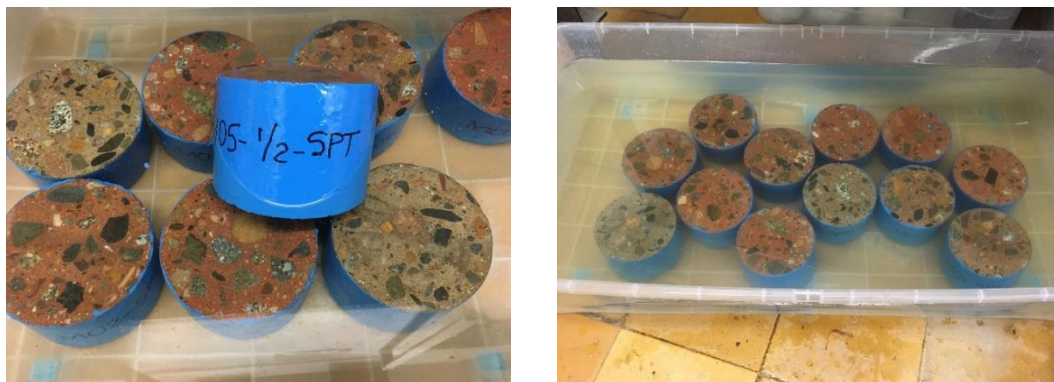
Se evaluará la profundidad de penetración de cloruros. No se determinará un coeficiente de difusión puesto que para ello es necesario tener como mínimo dos puntos de condiciones conocidas y de acuerdo con el método seguido solamente tenemos uno. Las probetas se acondicionaron de acuerdo con lo establecido en el NORDTEST NT-443. En total las probetas permanecieron sumergidas en solución salina por un tiempo de 148 días. El tiempo mínimo establecido en la NT-443 es de 10 semanas. Después de las primeras cinco semanas se renovó la solución salina y se mantuvo esta condición hasta el final del ensayo. En las Figuras 2-39 y 2-40 se aprecia el acondicionamiento de las probetas y la realización del ensayo.

**Figura 2-39** Preparación de probetas para ensayo SPT



Las probetas son recubiertas con pintura epóxica dejando expuesta únicamente una cara y posteriormente se sumergen en la solución salina. Fuente: propia.

**Figura 2-40** Sumergido de probetas en solución salina durante 148 días para ensayo SPT



Fuente: propia.



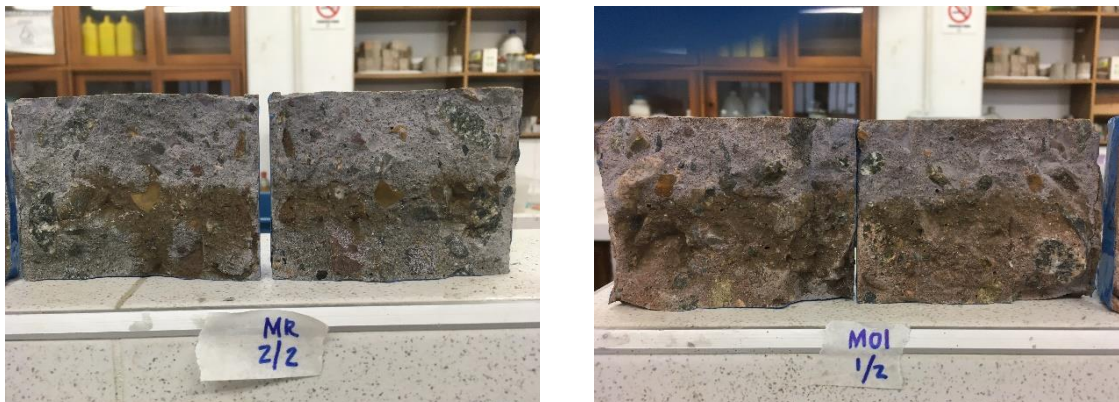
Al final del periodo de sumergido en la solución salina, las muestras se dividen por la mitad mediante aplicación de una fuerza de compresión en la prensa automax tal como se aprecia en la Figura 2-41. Puesto que el objetivo es únicamente dividir la muestra para exponer las caras y poder hacer las lecturas de profundidad de penetración, no se tomó lectura alguna de los valores de carga aplicados. Una vez expuestas las dos superficies fracturadas de la probeta se sigue el procedimiento establecido en NT-492 para medir la profundidad de penetración. Se rocía sobre la cara fracturada un revelador: nitrato de plata en este caso. Después de unos diez minutos se revela la profundidad de penetración por un proceso de reacción química entre el revelador (nitrato de plata) y la solución salina como se muestra en la Figura 2-42, 2-43 y 2-44.

**Figura 2-41** Prensa automax para partido de probetas de SPT.



Fuente: propia.

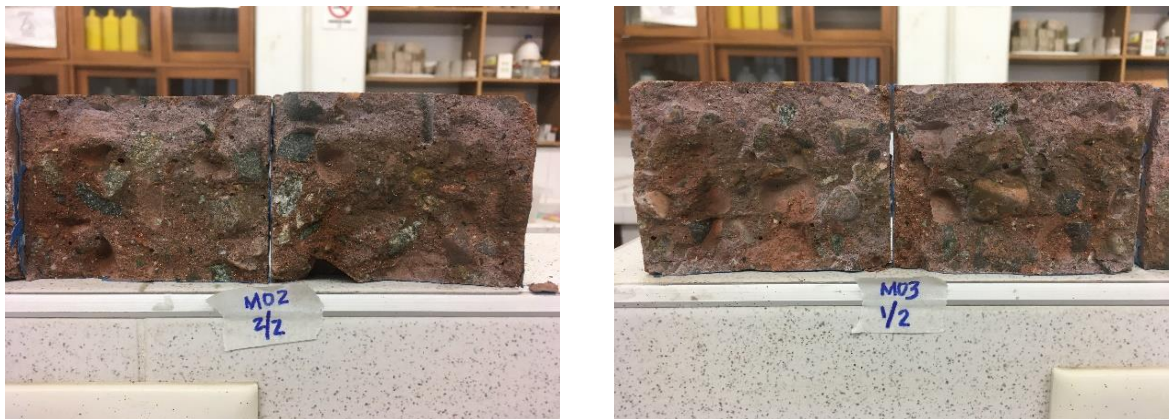
**Figura 2-42** Profundidad penetración cloruros en ensayo SPT mezclas MR y M01



Fuente: propia.



**Figura 2-43** Profundidad penetración cloruros en ensayo SPT mezclas M02 y M03



Fuente: propia.

**Figura 2-44** Profundidad penetración cloruros en ensayo SPT mezclas M04 y M05



Fuente: propia.

Se toman siete medidas de la profundidad de penetración dejando libre a cada extremo una distancia de al menos 1.5 cm para descartar lecturas erróneas que distorsionen los resultados por posibles infiltraciones de solución salina. Las medidas así hechas se consideran que corresponden a las de un flujo unidireccional.

### 2.3.8. Impedancia eléctrica

La probeta debe tener un diámetro mínimo de 100 mm y un espesor de 50 mm.

El ensayo mide la resistividad eléctrica de la mezcla. Existe una relación directa entre la resistividad eléctrica y la resistencia a la penetración de cloruros.

El ensayo se realiza con un potenciostato Gamry 600+ y una celda de Faraday mostrados en la Figura 2-45.

**Figura 2-45** Potenciostato Gamry 600+ y celda de Faraday para prueba EIS



Fuente: propia.

**Figura 2-46** Preparación probeta para ensayo de electro impedancia EIS



Fuente: propia.

La probeta se coloca en un recipiente con una solución de cloruro de potasio 0.1 M, sobre una lámina de acero inoxidable que sirve como electrodo y que está totalmente sumergido en la solución y en total contacto con la superficie de la probeta. Dentro de la manga se adiciona

otra cantidad de cloruro de potasio 0.1 M y se introduce otro electrodo que está sumergido en la solución y en total contacto con la superficie de la probeta. Ver Figura 2-47.

El potencióstato garantiza que el voltaje aplicado se mantenga constante. El ensayo mide la impedancia (inverso de la resistividad) y muestra los resultados en diagramas de Nyquist y de Bode. Los resultados de la impedancia se obtienen como la resistencia real correspondiente al menor valor de la resistencia imaginaria en un diagrama de Nyquist.



## 3. Capítulo 3 Discusión y resultados

### 3.1. Porosidad y densidad

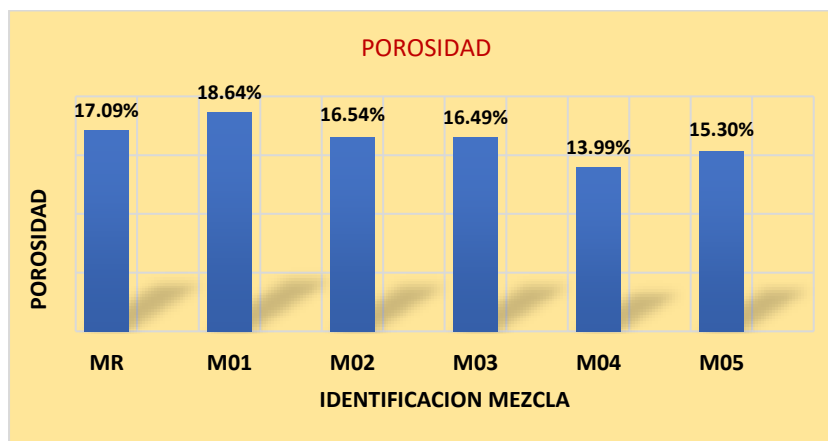
En la Tabla 3-1 se consignan los resultados de la porosidad y densidad junto a las proporciones de componentes de todas las mezclas.

Tabla 3-1 Porosidad y densidad NTC-5653 (ASTM C-642)

MEZCLA	POROSIDAD	DENSIDAD	PROPORCIONES			
	%	gr/cm <sup>3</sup>	CEMENTO	ARCILLA	CALIZA	TOTAL
MR	17,09%	2,14	100,0%	0,0%	0,00%	100%
M01	18,64%	2,10	85,3%	10,0%	1,78%	100%
M02	16,54%	2,17	74,3%	20,0%	2,82%	100%
M03	16,49%	2,14	62,4%	30,0%	3,99%	100%
M04	13,99%	2,19	57,4%	30,0%	9,47%	100%
M05	15,30%	2,16	51,7%	30,0%	15,02%	100%

Fuente: elaboración propia.

Figura 3-1 Comparativo de la porosidad entre MR y muestras adicionales M01 a M05.



Fuente: elaboración propia.

La porosidad se evaluó a los 90 días después de fundida la mezcla. Como se aprecia en la Figura 3-1 la mezcla M01 es la única que no reporta una mejor porosidad respecto a la mezcla de referencia MR. La mezcla M04 que presenta el mayor contenido de arcilla calcinada (30%)

con un contenido de caliza de 15% es la que presenta la menor porosidad. Puede decirse que a mayor contenido de arcilla calcinada menor es la porosidad. El contenido óptimo de caliza es del 15% y para valores mayores de este contenido la porosidad disminuye. Otros autores han reportado variaciones muy pequeñas en la porosidad en concretos LC3 respecto a concretos preparados con cemento pórtland. (Dhandapani et al., 2018a)

La densidad evaluada en todas las mezclas es prácticamente igual. La variación es mínima, como se aprecia en la Tabla 3-1. Se evidencia un pequeño incremento en las mezclas más adicionadas debido al refinamiento de la estructura de poros ya que la arcilla calcinada que está en una proporción del 30% se acomoda mejor dentro de la matriz reduciendo el volumen total de éstos.

### 3.2. Resistencia a la compresión y módulo de elasticidad

Tabla 3-2 Resistencia a la compresión y módulo de elasticidad

MEZCLA	Resistencia compresión $f'_c$ (Mpa)	Módulo Elasticidad E ( Mpa)	Proporciones (%)				Relación Adición / cemento (ac+ca)/cpo
			Cemento cpo	Arcilla calcinada ac	Caliza ca	Total	
MR	41,78	31815,0	100,0%	0,0%	0,00%	100%	0,00%
M01	37,79	30792,4	80,0%	10,0%	10,00%	100%	25,00%
M02	41,92	32065,0	70,0%	20,0%	10,00%	100%	42,86%
M03	40,95	29475,0	60,0%	30,0%	10,00%	100%	66,67%
M04	39,42	30555,0	55,0%	30,0%	15,00%	100%	81,82%
M05	34,75	27085,0	50,0%	30,0%	20,00%	100%	100,00%

Fuente: elaboración propia.

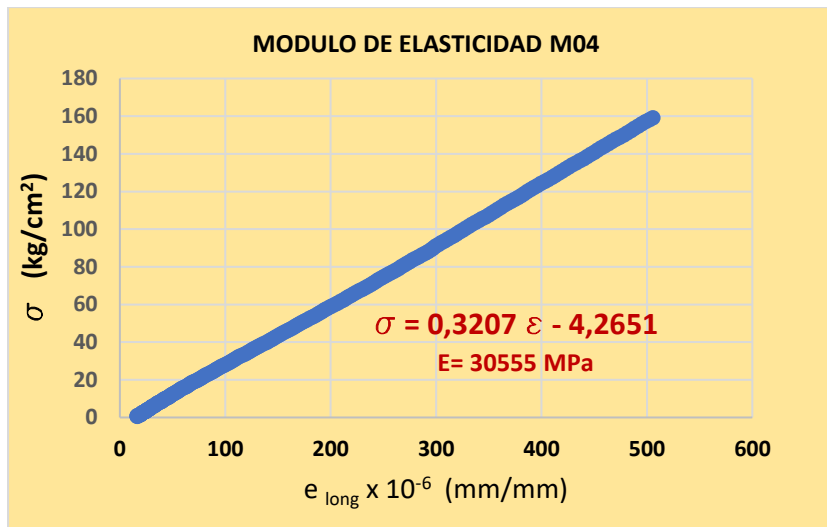
Todas las mezclas fueron ensayadas a edades comprendidas entre los 120 y 130 días. Los resultados de la Tabla 3-2 muestran que las mezclas M01, M02, M03 y M04 presentan resistencias similares a la de la mezcla de referencia MR. Resultados similares han sido reportado por otros investigadores. (Dhandapani et al., 2018a)

Estudios realizados en EPFL con cementos LC3 elaborados con caolinitas de baja gradación (40%), con un factor clinker de 50%, contenido de arcilla calcinada 30%, caliza 15% y yeso 5% sobre barras de mortero con relaciones  $a/c = 0.50$  y arena/cemento = 3 mostraron que esas proporciones son suficientes para dar resistencias mecánicas a los 7 días similares a las

muestras de referencia elaboradas con cemento pórtland (Alujas et al., 2015). Comparando con los resultados obtenidos en esta investigación corresponden a la mezcla M04.

En la Figura 3-2 se presenta la gráfica correspondiente a la evaluación del módulo de elasticidad de una de las probetas de la mezcla M04. El valor del módulo corresponde al promedio de los valores obtenidos para las probetas de esa mezcla. Igual procedimiento se hizo para todas las demás mezclas.

Figura 3-2 Gráfica del Módulo de elasticidad de la mezcla M04



Fuente: elaboración propia.

Tabla 3-3 Resistencia a la compresión y módulos de elasticidad.

MEZCLA	Resistencia compresión f'c (Mpa)	v'f'c Mpa	Módulo Elasticidad E ( Mpa)	$\mu$
MR	41,78	6,464	31815,0	4921,8
M01	37,79	6,147	30792,4	5009,3
M02	41,92	6,474	32065,0	4952,5
M03	40,95	6,399	29475,0	4605,9
M04	39,42	6,279	30555,0	4866,5
M05	34,75	5,894	27085,0	4595,0

Fuente: elaboración propia.

En cuanto al módulo de elasticidad, los resultados muestran que el módulo de las mezclas M01 y M02 es muy similar al de la mezcla de referencia MR para contenidos de arcilla calcinada de hasta el 20% y caliza 10%. Para las mezclas M03 y M04 con un contenido de

arcilla calcinada del 30% y caliza hasta un 15% el módulo disminuye un 5% y para la mezcla M05 con un contenido de arcilla calcinada del 30% y caliza el 20% el módulo de elasticidad disminuye un 7%.

Se han reportado resultados parecidos a los reportados en esta investigación, en donde concluyen que el módulo de elasticidad de a edades superiores a 28 días en concretos adicionados con cementos LC3 es similar al de concretos dosificados con cemento pórtland. (Dhandapani et al., 2018a)

En la Tabla 3-3 se determinó el valor de un coeficiente  $\mu$  igual a la relación entre el módulo de elasticidad encontrado y la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión con el fin de compáralo con las recomendaciones dadas en NSR-10.

La norma NSR-10 establece en C.8.5.1 que el módulo de elasticidad para concreto de densidad normal puede tomarse como

$$E = 4700 \sqrt{f'c} \text{ (MPa)}$$

Pero en los comentarios establece que el valor medio para toda la información experimental nacional. Sin distinguir por tipo de agregado, es

$$E = 3900 \sqrt{f'c} \text{ (MPa)}$$

Los resultados también son consistentes con la norma y entonces para concretos dosificados con arcilla calcinada hasta un 30% y caliza hasta un 15%, es decir para las mezclas M01 a M04, podría llegar a tomarse el valor del módulo de elasticidad igual al establecido en la primera recomendación de NSR-10.

### 3.3. Permeabilidad al aire

Las mezclas fueron ensayadas 93 días después de fundidas.

Los valores medios de los resultados obtenidos para todas las mezclas adicionadas y la de referencia se consignan en la tabla 3-4.



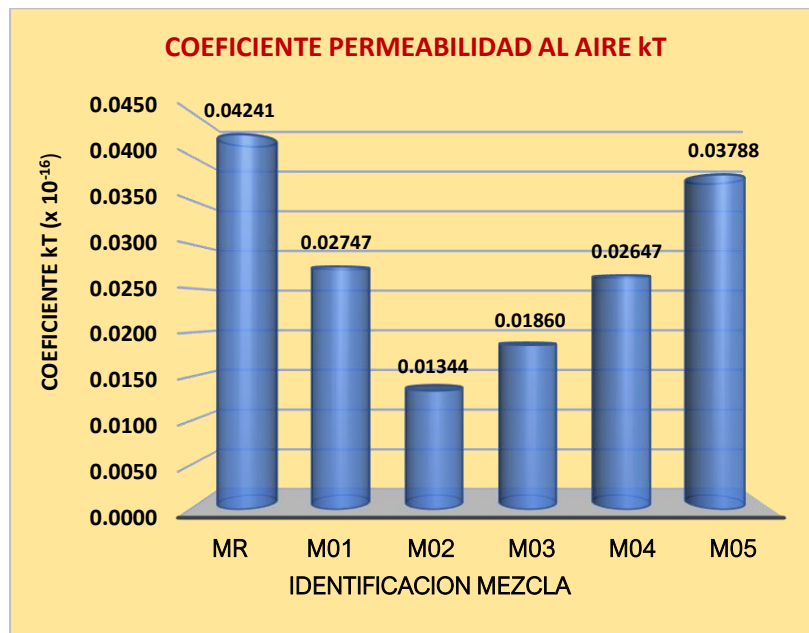
**Tabla 3-4** Coeficientes kT de permeabilidad al aire.

MEZCLA	kT	PENETRACION	CLASIFICACION	RELACION kT <sub>MXX</sub> / kT <sub>MR</sub>
	x (10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup> )	(mm)		
MR	0,04241	9,00	BAJA	1,00
M01	0,02747	7,24	BAJA	0,65
M02	0,01344	5,14	BAJA	0,32
M03	0,01860	5,74	BAJA	0,44
M04	0,02647	7,11	BAJA	0,62
M05	0,03788	8,45	BAJA	0,89

Fuente: elaboración propia.

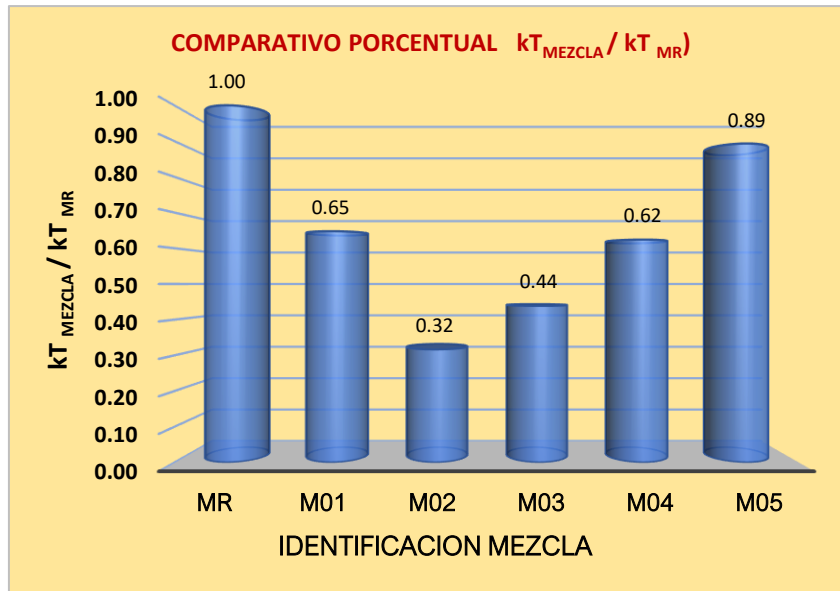
De acuerdo con la Tabla 3-4 todas las mezclas se clasifican con permeabilidad baja. Clase PK2 con valores de kT comprendidos entre (0.01 y 0.10) x 10<sup>-16</sup> m<sup>2</sup>. En la columna final de esta tabla se presenta una relación entre la permeabilidad de cada mezcla respecto a la permeabilidad de la mezcla de referencia MR (ver Figura 3-4). En la Figura 3-3 se puede apreciar que la permeabilidad al aire de todas las mezclas adicionadas es menor que la de la mezcla de referencia MR y que el valor mínimo corresponde a la mezcla M02 seguido de la mezcla M03. Estas mezclas logran un mayor refinamiento de la estructura de poros para una relación arcilla calcinada a caliza comprendida entre 2:1 y 3:1

**Figura 3-3** Comparativo coeficiente de permeabilidad al aire de todas las mezclas



Fuente: elaboración propia.

**Figura 3-4** Comparativo relativo entre el coeficiente  $kT$  permeabilidad de la mezcla de referencia MR y todas las mezclas adicionadas



Fuente: elaboración propia.

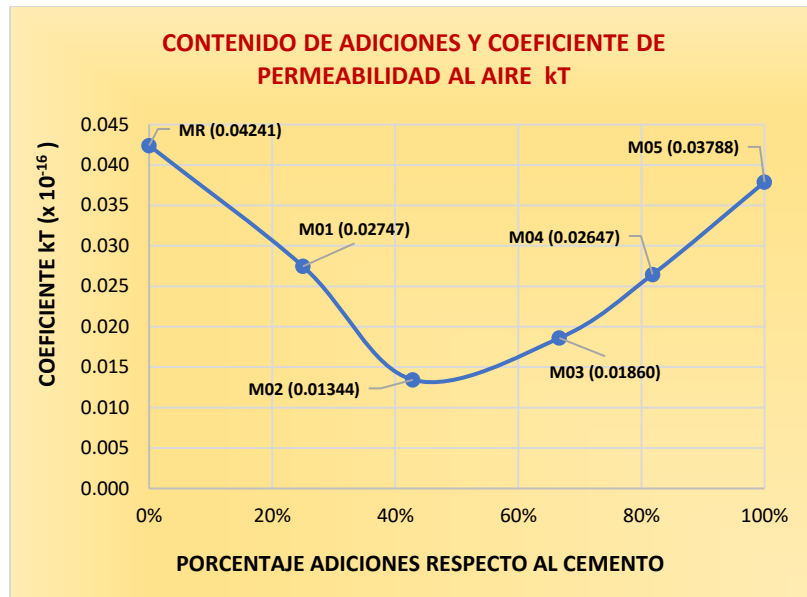
**Tabla 3-5** Coeficiente  $kT$ , profundidad de penetración y proporciones de mezcal.

MEZCLA	$K_t$ ( $\times 10^{-16} \text{ m}^2$ )	L(mm)	CEMENTO	ARCILLA	CALIZA	TOTAL	(ac+ca)/cpo
MR	0,04241	9,00	100,0%	0,0%	0,00%	100%	0,00%
M01	0,02747	7,24	80,0%	10,0%	10,00%	100%	25,00%
M02	0,01344	5,14	70,0%	20,0%	10,00%	100%	42,86%
M03	0,01860	5,74	60,0%	30,0%	10,00%	100%	66,67%
M04	0,02647	7,11	55,0%	30,0%	15,00%	100%	81,82%
M05	0,03788	8,45	50,0%	30,0%	20,00%	100%	100,00%

Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 3-5 se encuentra un resumen de los valores del coeficiente  $kT$ , la profundidad de penetración, las proporciones de los constituyentes de las mezclas y una relación de la proporción de adición respecto al contenido de cemento.

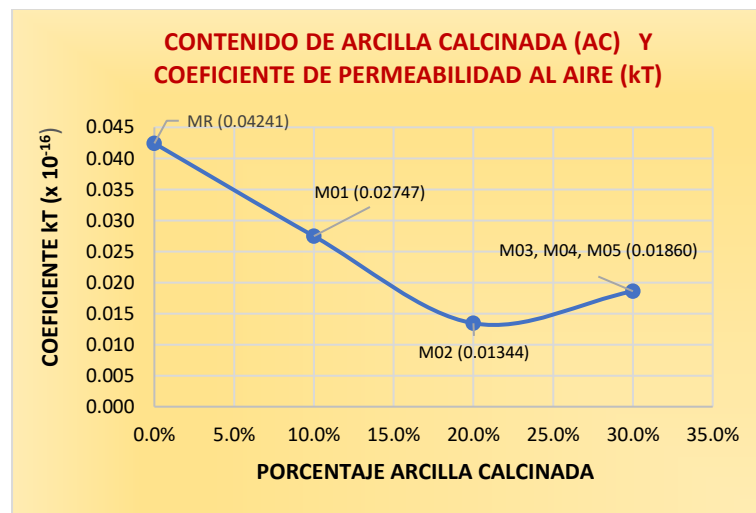
Figura 3-5 Relación entre porcentaje de adiciones y la permeabilidad al aire



Fuente: elaboración propia.

En la figura 3-5 puede verse que la mínima permeabilidad se alcanza para proporciones de arcilla calcinada más caliza respecto al contenido de cemento de un 45% aproximadamente y con una proporción de arcilla calcinada a caliza de 2:1.

Figura 3-6 Relación entre contenido de arcilla calcinada y la permeabilidad al aire



Fuente: elaboración propia.

En la Figura 3-6 puede verse que la mínima permeabilidad se alcanza cuando el contenido de arcilla calcinada es de un 20% aproximadamente respecto al contenido total de cemento más adiciones.

Todas las mezclas adicionadas mejoraron la permeabilidad respecto a la mezcla de referencia, siendo este resultado consistente con lo reportado por diferentes investigadores. (Ebensperger & Torrent, 2014)

Ebensperger y Torrent proponen predecir la vida útil de una estructura a partir del coeficiente  $kT$  y el espesor del recubrimiento. Proponen una expresión simplificada para una relación  $\text{agua}/c = 0.45$  y un espesor mínimo del recubrimiento de 45 mm.

$$T_i = 0.0086 C^2 / (kT)^3$$

En donde  $T_i$  representa la edad en años de inicio de la corrosión y  $C$  el espesor del recubrimiento en mm.

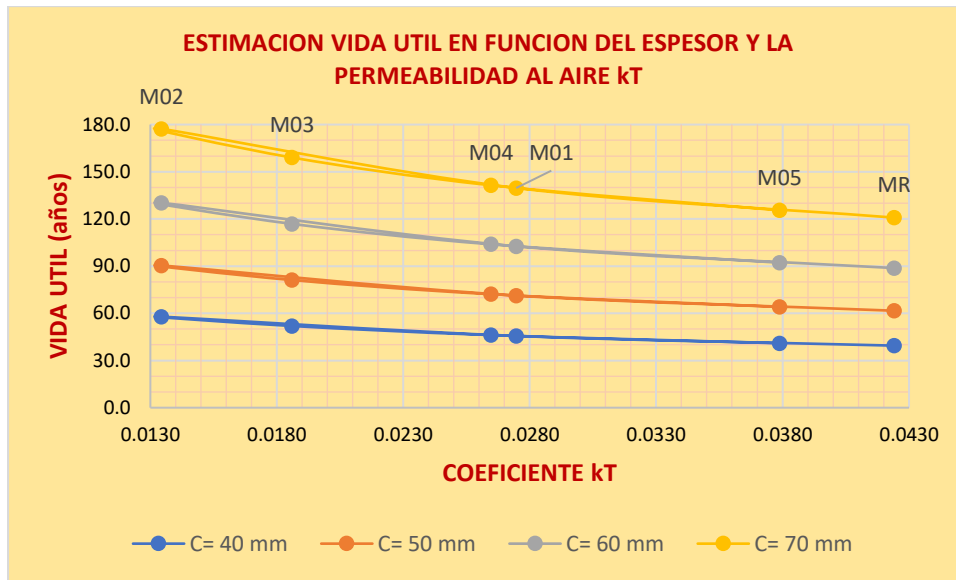
Si se aplica esta recomendación a los valores encontrados de  $kT$  y para recubrimientos entre 40 y 70 mm se tendrá:

**Tabla 3-6** Estimación de la vida útil en función del coeficiente  $kT$  y el recubrimiento

ESTIMACION VIDA UTIL (AÑOS) EN FUNCION DEL ESPESOR Y EL COEFICIENTE $kT$					
MEZCLA	$Kt \times (10^{-16} \text{ m}^2)$	Espesor recubrimiento en mm			
		40	50	60	70
MR	0,04241	39,5	61,7	88,8	120,8
M01	0,02747	45,6	71,3	102,6	139,7
M02	0,01344	57,9	90,4	130,2	177,3
M03	0,01860	51,9	81,1	116,9	159,0
M04	0,02647	46,2	72,1	103,9	141,4
M05	0,03788	41,0	64,0	92,2	125,5

Fuente: elaboración propia.

Figura 3-7 Estimación de la vida útil en función del espesor del recubrimiento y Kt



Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con la Tabla 3-6 y la Figura 3-7, las mejores proyecciones de vida útil se tienen para la mezcla M02 con un contenido de arcilla del 20% y de caliza del 10%. La vida útil de un concreto elaborado con cemento portland (MR) y con un recubrimiento mínimo de 40 mm sería de casi 40 años que es muy similar a la de la mezcla más adicionada M05. Para el mismo recubrimiento, pero para la mezcla óptima (M02) la vida útil es de 58 años, es decir predice un incremento de casi el 50%. En un punto intermedio está la mezcla M04 con un contenido de arcilla de 30% y caliza 15% que predice un incremento de la vida útil del 17%. Con un factor Clinker cercano al 50%. Esto se hace sólo a manera ilustrativa. Adicionalmente se debe tener en cuenta que la relación agua/cemento de las mezclas investigadas es diferente a la implícita en el modelo propuesto por Ebensperger y Torrent.

### 3.4. Permeabilidad al agua

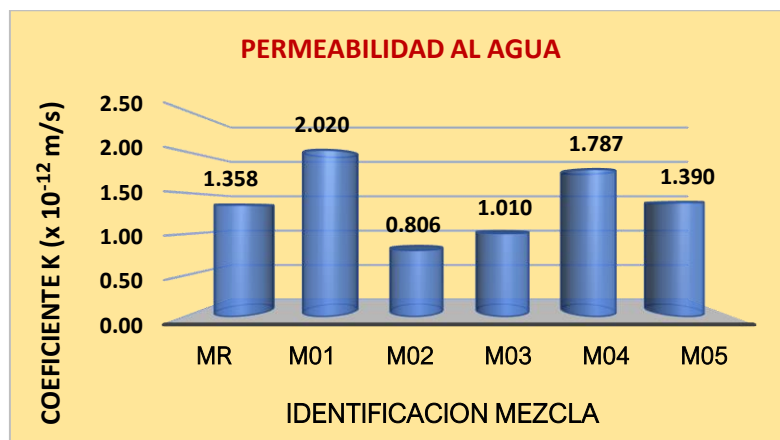
Las mezclas se ensayaron con edades comprendidas entre 90 y 110 días. Se montaron en el banco de pruebas simultáneamente probetas de todas las mezclas. Los resultados obtenidos se consignan en la tabla 3-7.

**Tabla 3-7** Coeficiente K de permeabilidad al agua, profundidad de penetración y proporciones de mezcla.

MEZCLA	K (m/s)	L(mm)	CEMENTO	ARCILLA	CALIZA	TOTAL	(ac+ca)/cpo
MR	1,3582E-12	16,74	100,0%	0,0%	0,00%	100%	0,00%
M01	2,01962E-12	19,54	80,0%	10,0%	10,00%	100%	25,00%
M02	8,0628E-13	13,11	70,0%	20,0%	10,00%	100%	42,86%
M03	1,01043E-12	14,70	60,0%	30,0%	10,00%	100%	66,67%
M04	1,78723E-12	21,22	55,0%	30,0%	15,00%	100%	81,82%
M05	1,38974E-12	17,89	50,0%	30,0%	20,00%	100%	100,00%

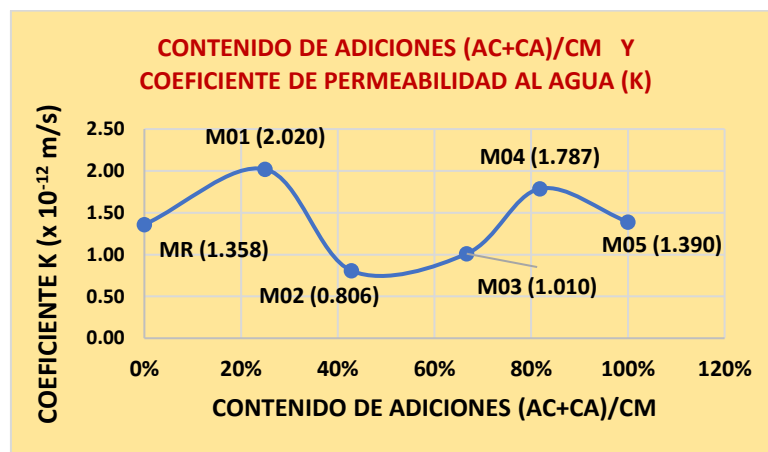
Fuente: elaboración propia.

**Figura 3-8** Comparativo entre las mezclas del coeficiente K permeabilidad al agua



Fuente: elaboración propia.

**Figura 3-9** Curva Comparativo coeficiente K permeabilidad al agua



Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con las Figuras 3-8 y 3-9 sólo reflejan que todas las mezclas tienen baja permeabilidad. La causa de la no confiabilidad en los resultados es el desprendimiento de la capa de pintura epóxica aplicada que permitió la formación de bolsas de agua entre la cara de la probeta y la capa de pintura originando un flujo en sentido horizontal. Distorsionando los resultados El ensayo debe hacerse unidireccionalmente.

### 3.5. ENSAYO NORDTEST- 492.

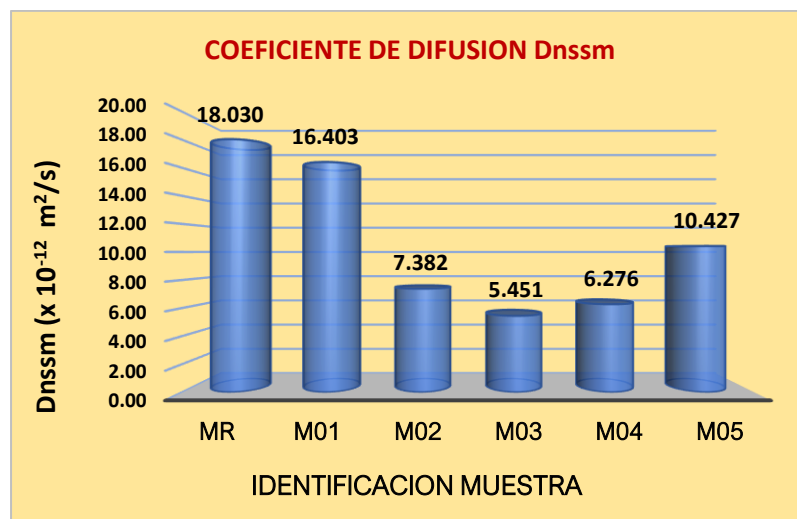
Las muestras se ensayaron con una edad de 120 días y los resultados se consignan en la tabla 3-8.

**Tabla 3-8** Coeficiente Dnssm, profundidad de penetración y proporciones de mezcla.

MEZCLA	Dnssm 10 <sup>-12</sup> (m <sup>2</sup> /s)	PENETRAC, mm	CEMENTO	ARCILLA	CALIZA	TOTAL	(ac+ca)/cpo
MR	18,030	35,27	100,0%	0,0%	0,00%	100%	0,00%
M01	16,403	17,75	80,0%	10,0%	10,00%	100%	25,00%
M02	7,382	13,76	70,0%	20,0%	10,00%	100%	42,86%
M03	5,451	10,32	60,0%	30,0%	10,00%	100%	66,67%
M04	6,276	11,68	55,0%	30,0%	15,00%	100%	81,82%
M05	10,427	18,60	50,0%	30,0%	20,00%	100%	100,00%

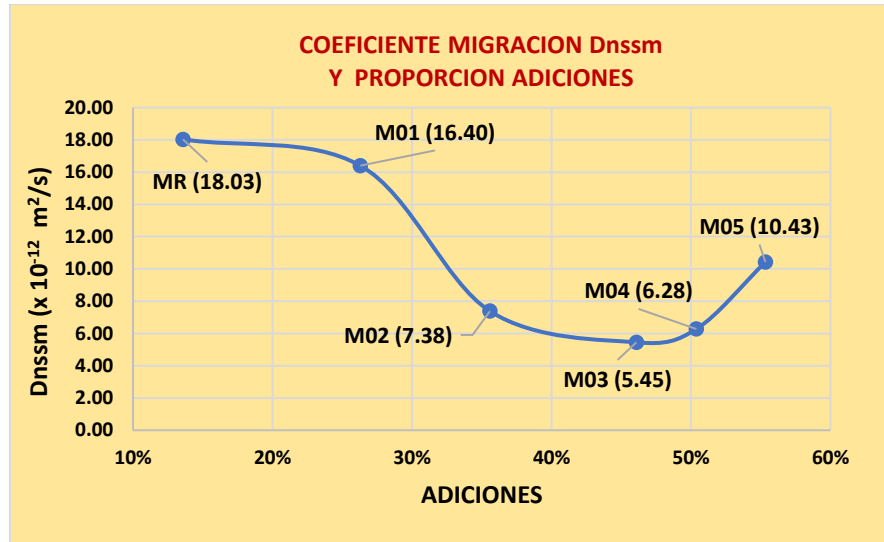
Fuente: elaboración propia.

**Figura 3-10** Comparativo coeficiente migración de cloruros Dnssm Nortest N-492



Fuente: elaboración propia.

Figura 3-11 Comparativo entre coeficiente  $D_{nssm}$  y contenido de adiciones



Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 3-8 se ve que la profundidad de penetración en todas las muestras adicionadas fue menor que la de la mezcla de referencia (MR) y consistentemente con esto los coeficientes de migración calculados son también menores.

En las Figuras 3-10 y 3-11 el menor coeficiente de difusión se presenta en la mezcla M03 con un contenido de arcilla calcinada del 30% y de caliza del 10%, es decir con un nivel de reemplazo del 40%. Las mezclas M02 y M04 tienen una profundidad de penetración similar entre ellas con un coeficiente de difusión algo mayor que el de la mezcla M03, pero con unos niveles de reemplazo de 30% y 45% respectivamente.

Estos resultados son consecuentes con lo reportado por diferentes investigadores (Scrivener, Avet, et al., 2018)

### 3.6. Ensayo de estancamiento de sal (Salt ponding test - SPT)

Las mezclas permanecieron sumergidas en solución salina durante 148 días antes de ser ensayadas. No se determinó un coeficiente de migración debido a que sólo se dispone de un punto para aplicar la Ley de Fick, y mínimo se requieren dos puntos con condiciones conocidas. Sin embargo, la medida de la profundidad de penetración es una medida de la



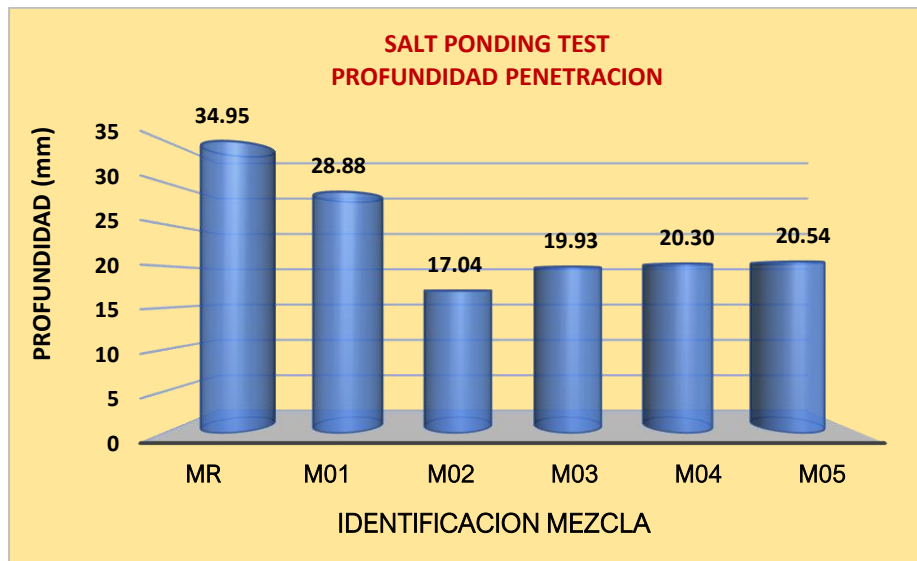
resistencia de las mezclas a la penetración de cloruros. Los resultados se consignan en la Tabla 3-9.

**Tabla 3-9** profundidad de penetración SPT y proporciones de mezcla

MEZCLA	PROFUND mm	PROPORCIONES (%)				
		CEMENTO cpo	ARCILLA ac	CALIZA ca	TOTAL	(ac+ca)/cpo
MR	34,95	100,0%	0,0%	0,00%	100%	0,00%
M01	28,88	80,0%	10,0%	10,00%	100%	25,00%
M02	17,04	70,0%	20,0%	10,00%	100%	42,86%
M03	19,93	60,0%	30,0%	10,00%	100%	66,67%
M04	20,30	55,0%	30,0%	15,00%	100%	81,82%
M05	20,54	50,0%	30,0%	20,00%	100%	100,00%

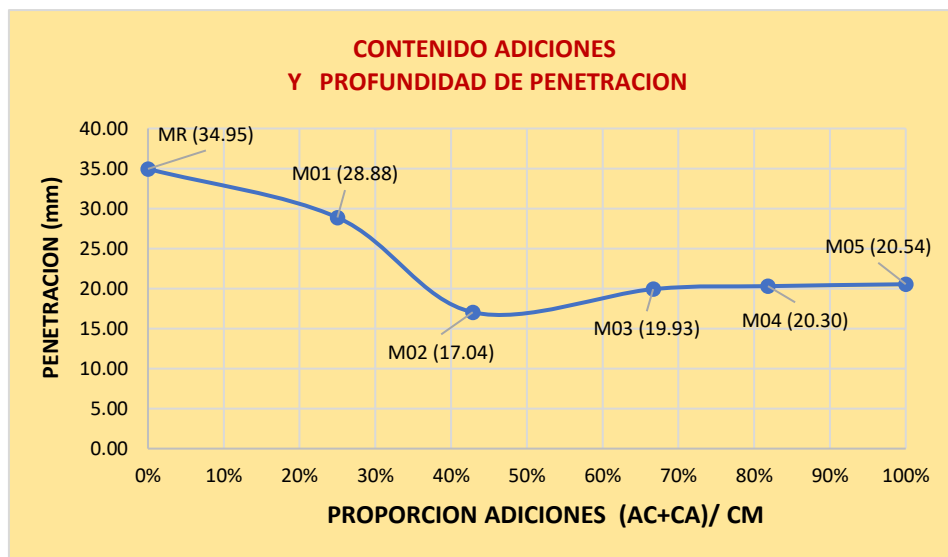
Fuente: elaboración propia.

**Figura 3-12** Comparativo profundidad penetración cloruros Salt Ponding Test



Fuente: elaboración propia.

Figura 3-13 Comparativo profundidad penetración cloruros Vs relación contenido adiciones respecto al contenido de cemento



Fuente; elaboración propia.

En las Figuras 3-12 y 3-13 se aprecia que todas las mezclas adicionadas tienen una menor profundidad de penetración que la mezcla de referencia mostrando que la adición de arcilla calcinada y caliza si disminuye la permeabilidad debida principalmente a un refinamiento de la estructura de poros.

La mezcla M02 con un contenido de arcilla calcinada de 20% y caliza de 10% presenta la menor penetración, es decir tiene la mayor resistencia a la penetración de cloruros.

Las mezclas M03, M04 y M05 presentan resultados muy similares, pero con porcentajes de sustitución mayores. 40% para M03, 45% para M04 y 50% para M05.

Estos resultados son consistentes por lo reportado por diferentes autores. (Nguyen et al., 2020) ; (Scrivener, Martirena, et al., 2018); (Zunino et al., 2021); (Sharma et al., 2021)

### 3.7. Impedancia eléctrica

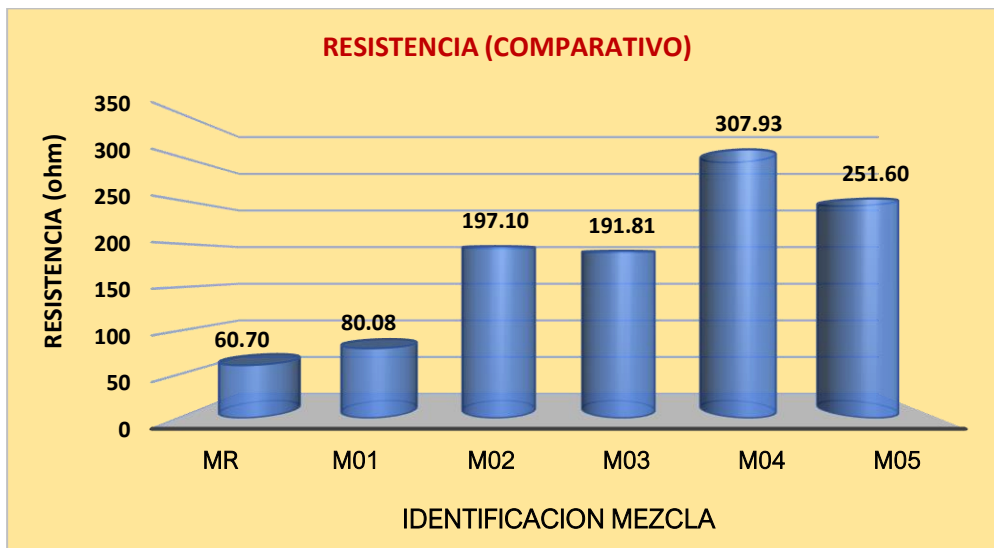
Los resultados de estos ensayos se consignan en la Tabla 3-10.

**Tabla 3-10** Resistividad eléctrica. Ensayo electro impedancia

MEZCLA	RESISTENCIA Ohm	IMPEDANCIA ELECTRICA (Ohm-m)	PROPORCIONES				
			CEMENTO (CM)	ARCILLA (AC)	CALIZA (CA)	TOTAL CM+AC+CA	$\frac{(AC + CA)}{CM}$
MR	60.70	9.80	100.0%	0.0%	0.00%	100%	0.00%
M01	80.08	12.74	80.0%	10.0%	10.00%	100%	25.00%
M02	197.10	31.64	70.0%	20.0%	10.00%	100%	42.86%
M03	191.81	30.95	60.0%	30.0%	10.00%	100%	66.67%
M04	307.93	49.47	55.0%	30.0%	15.00%	100%	81.82%
M05	251.60	40.12	50.0%	30.0%	20.00%	100%	100.00%

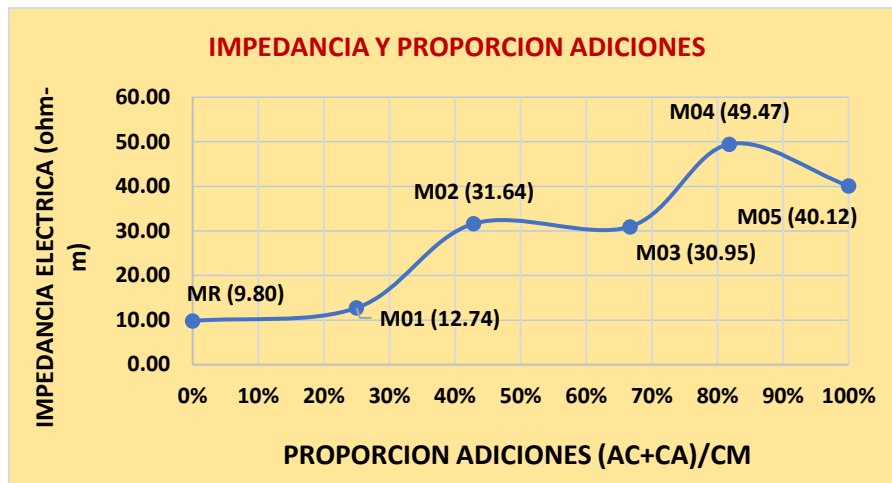
Fuente: elaboración propia.

**Figura 3-14** Comparativo resistividad eléctrica



Fuente: elaboración propia.

Figura 3-15 Comparativo entre impedancia eléctrica y proporción de adiciones respecto al contenido de cemento

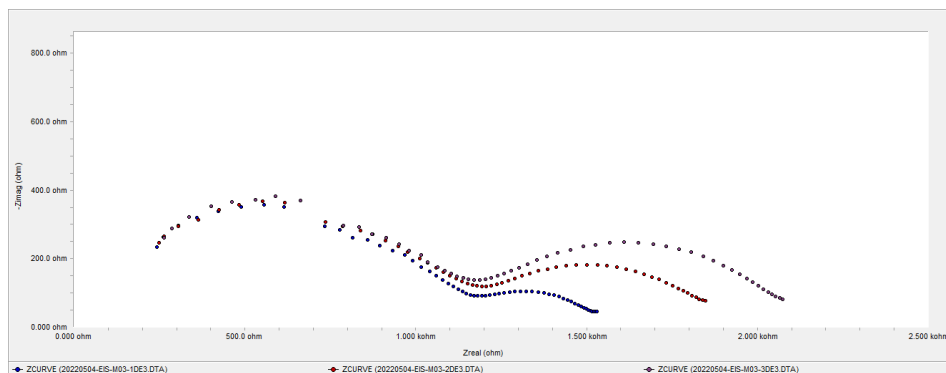


Fuente: elaboración propia.

Las Figuras 3-14 y 3-15 muestran que todas las mezclas adicionadas presentan mayor resistencia a la penetración de cloruros que la mezcla de referencia MR. Este resultado es consistente con lo encontrado en los ensayos de migración y difusión de cloruros. La mejora en el desempeño se atribuye principalmente al aumento de la alcalinidad de la solución de poros por la presencia de la arcilla calcinada. El refinamiento de la estructura de poros tiene una incidencia menor.

La Figura 3-16 muestra la forma en que el programa Gamry Echem Analyst presenta el resultado de la prueba mediante un diagrama de Nyquist.

Figura 3-16 Diagrama Nyquist M03 ensayo electro impedancia



Fuente: imagen tomada de (Gamry Echem Analyst, 2011).

## 4. Capítulo 4: Comparativo entre las propiedades relacionadas con la durabilidad y la permeabilidad al aire

### 4.1. Análisis estadístico

En esta investigación se utilizó la estadística descriptiva para el manejo y presentación de la información debido a la naturaleza cuantitativa de los datos obtenidos en el laboratorio. Los valores evaluados en cada ensayo están definidos en las normas correspondientes a cada prueba realizada. En estas normas se establece el procedimiento, la variable a medir y las unidades correspondientes.

Los ensayos se hicieron sobre la totalidad de las probetas preparadas para cada tipo de mezcla.

#### 4.1.1. Procedimiento

Con los datos obtenidos en cada ensayo para cada una de las mezclas estudiadas se hizo el siguiente proceso:

1. Se determinó como medida de centralización el promedio aritmético.
2. Se determinó como medida de dispersión la desviación estándar.
3. Se determinaron como datos atípicos aquellos que estuvieran por fuera del rango más o menos 1.5 desviaciones estándar respecto al promedio.
4. Se tabuló la información presentada en el cuerpo de este documento.
5. Se construyeron los gráficos explicativos necesarios para la visualización y posterior interpretación de los resultados.

#### 4.1.2. Hipótesis (planteamiento y validación)

En una fase posterior se recurrió a la estadística inferencial para validar las dos hipótesis siguientes y hacer las conclusiones:

Hipótesis 1: Las arcillas calcinadas y la caliza mejoran el desempeño mecánico de los concretos adicionados con ellas.

Hipótesis 2: Las arcillas calcinadas y la caliza mejoran el desempeño frente a ataque de cloruros en concretos adicionados con ellas.

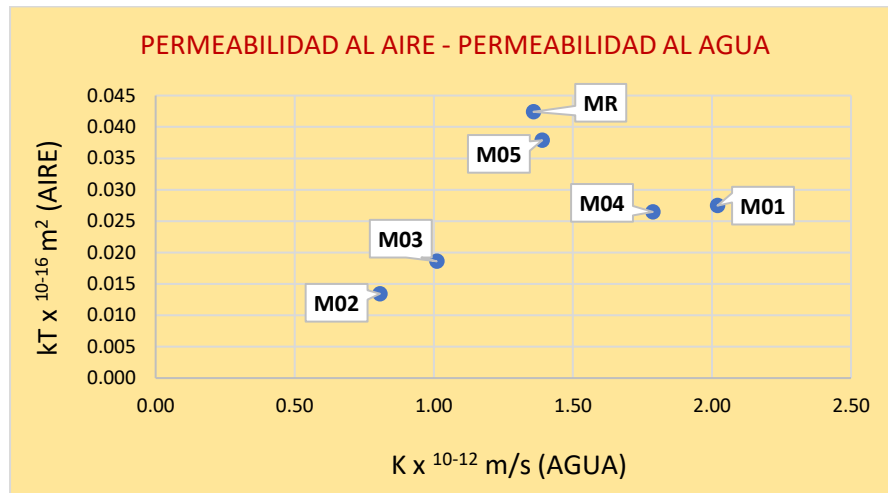
Frente a la primera hipótesis se validó que las mezclas adicionadas con arcilla calcinada y caliza M01, M02, M03 y M04 presentan un desempeño mecánico similar o superior al de la mezcla de referencia MR atribuible principalmente a un refinamiento de la matriz de poros y a la sinergia entre las adiciones que ayudan a generar más productos de hidratación. La mezcla M05 presenta un desempeño menor debido al bajo contenido de Clinker.

Frente a la segunda hipótesis se validó que la totalidad de las mezclas M01, M02, M03, M04 y M05 presentan un mejor desempeño frente al ataque de cloruros que el de la mezcla de referencia MR. Esto se debe esencialmente al aporte de aluminatos por parte de la arcilla calcinada que ayudan a formar una barrera resistente al paso de los cloruros.

Finalmente con todo lo anterior se hicieron los comparativos presentados a continuación y se escribieron las conclusiones y recomendaciones.

## 4.2. Comparativo con la permeabilidad al agua

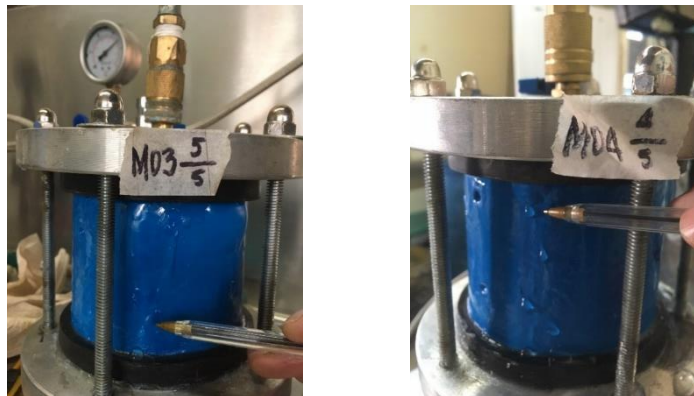
Figura 4-1 Comparativo permeabilidad al aire y permeabilidad al agua



Fuente: elaboración propia.

Como se aprecia en la Figura 4-1, no se puede establecer una relación cuantitativa entre la permeabilidad al agua y la permeabilidad al aire. Se puede apreciar que todas las mezclas tienen menor valor del coeficiente de permeabilidad al aire  $kT$  que el de la mezcla de referencia MR, pero solamente las mezclas M02 y M03 presentan menores valores del coeficiente  $K$  de permeabilidad al agua que el de la mezcla de referencia. Este resultado no puede tomarse como evidencia debido a que los resultados de permeabilidad al agua fueron afectados por el desprendimiento de la pintura epóxica en algunas zonas de las probetas permitiendo la formación de burbujas de agua entre la superficie de la probeta y la capa de pintura.

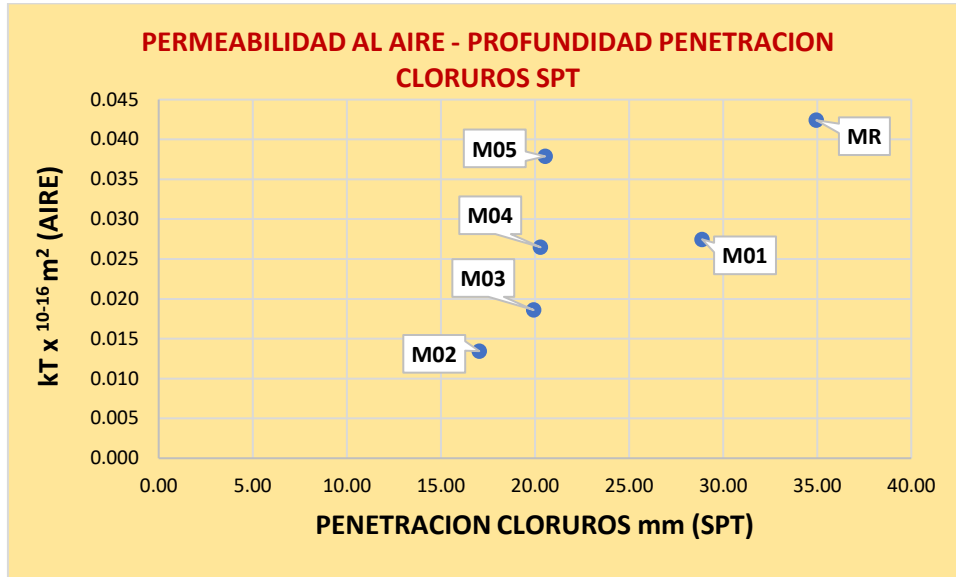
Figura 4-2 Formación de burbujas y goteo debido al desprendimiento de la pintura.



Fuente: propia.

### 4.3. Comparativo con la difusión de cloruros. (SPT).

Figura 4-3 Comparativo entre permeabilidad al aire con profundidad de penetración de cloruros. Salt Ponding Test.



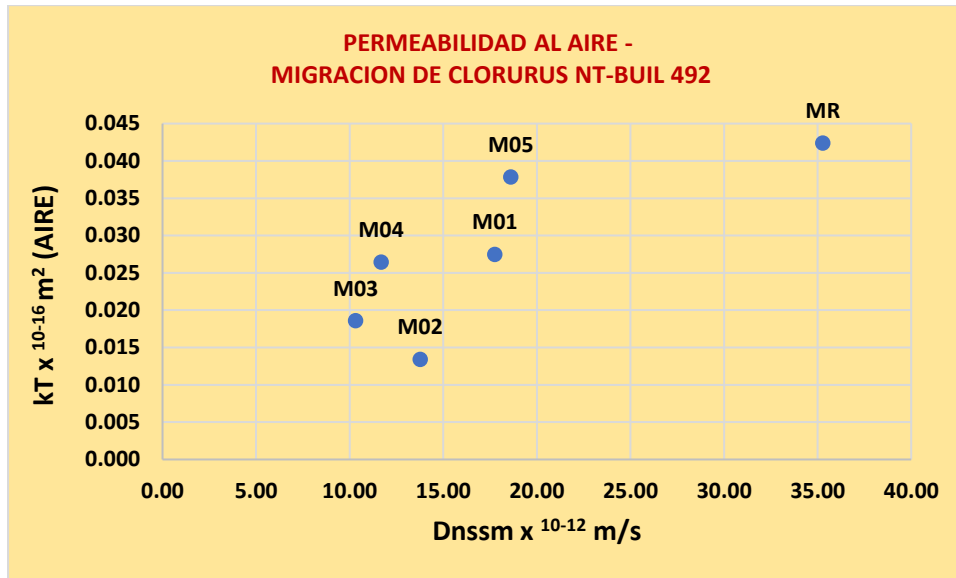
Fuente: elaboración propia.

En la Figura 4-3 se evidencia que los resultados obtenidos son consistentes entre la permeabilidad al aire y la difusión de cloruros. La mezcla de referencia MR presenta el mayor coeficiente de permeabilidad al aire y la mayor profundidad de penetración, a su vez las mezclas M02 y M03 presentan los menores valores. Se puede concluir que la adición de arcilla calcinada y caliza efectivamente disminuye la permeabilidad y que las mezclas con mejores resultados son la M02 y M03 que corresponden a una proporción de arcilla calcinada más caliza entre el 43% y 67% respecto al cemento y con una relación arcilla calcinada a caliza entre 2:1 a 3:1.



### 4.4. Comparativo con la migración de cloruros (NT-BUILD 492)

Figura 4-4 Comparativo permeabilidad al aire con migración de cloruros NT BUILD 492.



Fuente: elaboración propia.

En general todas las mezclas tienen menor permeabilidad al aire y una mayor resistencia a la migración de cloruros (menor valor de Dnssm). La mayor resistencia a la penetración de cloruros se logra con las mezclas M03 y M04 que tiene un contenido de arcilla calcinada del 30% y caliza entre el 10% y 15%. Si se aumenta la proporción de caliza más allá de este valor la resistencia a la penetración de cloruros disminuye.



## 5. Capítulo 5 Conclusiones

**La adición de arcilla calcinada y caliza mejora la resistencia a la compresión.** La resistencia obtenida con una sustitución de arcilla calcinada igual al 30% y caliza del 15% (M04) es apenas un 5% menor a la de la mezcla de referencia (MR). Es decir, con un contenido de Clinker igual a 55%, en los concretos adicionados con caliza y arcilla calcinada se obtienen resistencias similares a las de concretos preparados con cemento pórtland. La proporción óptima de arcilla calcinada más caliza con la que se logran las más altas resistencias está entre el 50% y 67% del contenido de cemento portland y la proporción de arcilla calcinada a caliza debe estar comprendida entre 2:1 y 3:1.

**La adición de arcilla calcinada y caliza mejora el módulo de elasticidad.** Al igual que con la resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad obtenido con una sustitución de arcilla calcinada igual al 30% y caliza del 15% (M04) es también apenas un 5% menor al de la mezcla de referencia (MR). De acuerdo con los resultados del módulo de elasticidad mostrados en la tabla 3.3 puede afirmarse que estos están de acuerdo con los valores recomendados en la norma NSR-10 para concreto de densidad normal; y entonces para concretos dosificados con arcilla calcinada y caliza el módulo de elasticidad puede tomarse igual al establecido en la norma basado en el resultado de la resistencia a la compresión. (AIS Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2012).

Debido al incremento de la superficie específica por la adición de arcilla calcinada, se evidencia una mayor demanda de agua que se ve reflejada en la reducción de la trabajabilidad de las mezclas comparadas con la mezcla de referencia. Se hace necesario la utilización de un aditivo plastificante.

**No se encuentra ningún tipo de relación cuantitativa entre la permeabilidad al aire y la permeabilidad al agua.** Cualitativamente ambos ensayos dieron como resultado en todas las mezclas adicionadas permeabilidades más bajas que la de la mezcla de referencia MR.

Todas las mezclas adicionadas con arcilla calcinada y caliza presentan una reducción en la permeabilidad como consecuencia de una estructura de poros más refinada. Con un contenido de arcilla calcinada del 20% y de caliza del 10% se logra la menor permeabilidad al aire. Hay que tener en cuenta que estos resultados se tienen utilizando arcilla calcinada de baja gradación que presenta un contenido de caolinita de un 40%. Si se utilizan arcillas calcinadas de mayor gradación el contenido de arcilla calcinada puede aumentarse al igual que el de caliza permitiendo entonces reducir el contenido de Clinker aún más. Esto se traduce en una mejora ambiental al reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>; una mejora económica al reducir los costos de producción y una mejora en la sostenibilidad de la industria cementera debido a la abundancia de arcillas caoliniticas en la corteza terrestre.

**El efecto combinado de la arcilla calcinada y la caliza mejoran la resistencia a la penetración de cloruros.** Los resultados de los ensayos de difusión de cloruros (Salt Ponding Test) son consistentes con los resultados del ensayo de migración de cloruros (NT Build 492) e impedancia eléctrica. Esta mejora se debe a la formación de una estructura de poros más refinada e intrincada que reduce la permeabilidad de las mezclas y al aumento de la resistividad eléctrica debido a la presencia de las adiciones, especialmente la arcilla que aumenta la alcalinidad del concreto. Ver tabla 5.1.

**Tabla 5-1** Comparativo valores pruebas de durabilidad

MEZCLA	COEF. PERM. AL AGUA K (x 10 <sup>-12</sup> m/s)	COEF. PERM. AL AIRE kT (x 10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup> )	PROFUNDIDAD PENETRACION CLORUROS SPT (mm)	COEF.MIGRACION DE CLORUROS NT-492 Dnssm (x 10 <sup>-12</sup> m/s)	IMPEDANCIA ELECTRICA (Ohm-m)
MR	1.358	0.04241	34.95	35.2690	9.80
M01	2.020	0.02747	28.88	17.7521	12.74
M02	0.806	0.01344	17.04	13.7607	31.64
M03	1.010	0.01860	19.93	10.3171	30.95
M04	1.787	0.02647	20.30	11.6771	49.47
M05	1.390	0.03788	20.54	18.6036	40.12

Fuente: elaboración propia.

Desde el punto de vista ambiental y de sostenibilidad, debido a que el contenido de Clinker puede reducirse hasta un 40 a 50% conservando valores similares de las propiedades mecánicas como la resistencia y el módulo de elasticidad a la de los concretos mezclados con cemento pórtland; y como la cantidad de arcillas caoliniticas de baja gradación que pueden

ser calcinadas y utilizadas como material cementicio suplementario es extremadamente grande, la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> ayudarían a cumplir con las metas establecidas en los acuerdo de París y la hoja de ruta Nacional. Una reducción global del cemento a un promedio de 60% implica una reducción adicional de 400 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> al año, (Zunino et al., 2021).

Finalmente el porcentaje de sustitución de Clinker podría llegar a ser del orden del 60% si se tiene en cuenta solamente la mejora de las propiedades mecánicas de los concretos, resistencia a la compresión y módulo de elasticidad. Pero desde el punto de vista de la durabilidad, un nivel de sustitución de ese orden conlleva una gran disminución de la reserva de material carbonatable y provoca una disminución en el PH facilitando el inicio de la corrosión por carbonatación y por tanto sacrificando la durabilidad.



## 6. Capítulo 6 Trabajos futuros

Investigar las propiedades de mezclas preparadas con los mismos agregados y materiales cementantes utilizados en esta investigación conservando las mismas proporciones arcilla calcinada: caliza, pero dosificadas con diferentes relaciones agua/ material cementante.

Investigar la optimización de las mezclas con los materiales que se disponen localmente, especialmente la relación arcilla calcinada – caliza utilizando caolinitas de mayores gradaciones.

Se requiere ajustar la normatividad vigente para que tenga en cuenta los cambios que implican el uso de cementos adicionados con arcilla calcinada y caliza. Por ejemplo, para tener en cuenta la disminución en el porcentaje de Clinker de los cementos adicionados con arcilla calcinada y caliza se debe ajustar la proporción agua: material cementante.

En el alcance de esta tesis no se consideró la carbonatación. El grupo de investigación en análisis y diseño está adelantando una investigación sobre la corrosión inducida por carbonatación en cementos adicionados con caliza y arcilla calcinada. En el laboratorio de la Universidad Nacional reposan las probetas estudiadas en los ensayos de permeabilidad al aire, NT-492, electro impedancia, porosidad y densidad.





## BIBLIOGRAFIA

ACI 201.2R-01, O, R. C., Presidente Russell Hill Secretario W Barry Butler Joseph G Cabrera, N. L., Carrasquillo William E Ellis, R. L., Bernard Erlin Per Fidjestøl Stephen Forster Clifford Gordon Roy Harrell Harvey H Haynes Eugene D Hill, J. W., Charles Hookham R Doug Hooton Allen J Hulshizer Donald J Janssen Roy H Keck Mohammad S Khan Paul Klieger, J. J., Lamond Cameron MacInnis Stella L Marusin Bryant Mather Mohamad A nagi Robert E Neal Charles K Nmai William F Perenchio Robert E Price, J. L., Prusinski Hannah C Schell James W Schmitt Charles F Scholer Jan P Skalny Meter Smith George W Teodoru Niels Thaulow Michael D Thomas J Derle Thorpe Paul J Tikalsky Claude B Trusty David A Whiting, J. R., & Craig Williams Yoga Yogendran, J. v. (2001). *Guía para la Durabilidad del Hormigón Informado por el Comité ACI 201*.

AIS Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2012). *Reglamernto Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10: Vol. Titulo C-8*.

Almas, K., Chandra Mohan Rao, B. D. v, Yadav, M. J., & Swamy Naga Ratna Giri, P. (2021). Performance studies on limestone calcined clay based concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1091(1), 012076. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1091/1/012076>

Almenares Reyes, R. S., Díaz, A. A., Rodríguez, S. B., Rodríguez, C. A. L., & Hernández, J. F. M. (2018). *Assessment of Cuban Kaolinitic Clays as Source of Supplementary Cementitious Materials to Production of Cement Based on Clinker – Calcined Clay – Limestone* (pp. 21–28). [https://doi.org/10.1007/978-94-024-1207-9\\_4](https://doi.org/10.1007/978-94-024-1207-9_4)

Alujas, A., Fernández, R., Quintana, R., Scrivener, K. L., & Martirena, F. (2015). Pozzolanic reactivity of low grade kaolinitic clays: Influence of calcination temperature and impact of calcination products on OPC hydration. *Applied Clay Science*, 108, 94–101. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.01.028>

- Asociación de fabricantes de cemento portland. (2014). *La industria del cemento y la sostenibilidad*. <https://web1.icpa.org.ar/wp-content/uploads/2019/04/La-industria-del-cemento-y-la-sostenibilidad-V-DIGITAL.pdf>
- ASTM International. (2003). C 618-03 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. In *ASTM International*. [www.astm.org](http://www.astm.org)
- Chappex, T., & Scrivener, K. L. (2012). The influence of aluminium on the dissolution of amorphous silica and its relation to alkali silica reaction. *Cement and Concrete Research*, *42*(12), 1645–1649. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.09.009>
- DANE. (2022). Estadísticas del cemento gris. *Boletín Técnico*, 1–1.
- Datosmacro.com. (2021). *Emisiones CO2 toneladas per capita 2021*. <https://datosmacro.expansion.com/energia-y-medio-ambiente/emisiones-co2>
- Dhandapani, Y., Sakthivel, T., Santhanam, M., Gettu, R., & Pillai, R. G. (2018a). Mechanical properties and durability performance of concretes with Limestone Calcined Clay Cement (LC3). *Cement and Concrete Research*, *107*, 136–151. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.005>
- Dhandapani, Y., Sakthivel, T., Santhanam, M., Gettu, R., & Pillai, R. G. (2018b). Mechanical properties and durability performance of concretes with Limestone Calcined Clay Cement (LC3). *Cement and Concrete Research*, *107*, 136–151. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.005>
- Ebensperger, Luis, & Torrent, R. (2014). *Ensayo in-situ de Permeabilidad al Aire: ¿Un medidor de Durabilidad?* <https://doi.org/10.13140/2.1.1314.1449>
- Favier, A., & Scrivener, K. (2018). *Alkali Silica Reaction and Sulfate Attack: Expansion of Limestone Calcined Clay Cement* (pp. 165–169). [https://doi.org/10.1007/978-94-024-1207-9\\_26](https://doi.org/10.1007/978-94-024-1207-9_26)
- FICEM, F. I. del C., & PROCEMCO, C. C. del cemento y el concreto. (2021). *Hoja de Ruta Colombia Industria del cemento* (pp. 20–22). PROCEMCO.
- Gamry Echem Analyst. (2011). *Gamry Instruments Services*. [www.gamry.com](http://www.gamry.com)

- ICONTEC. (1994). *NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 1776 Ingeniería civil y arquitectura. Método de ensayo para determinar por secado el contenido total de humedad de los agregados. Correspondencia: ésta norma es equivalente a su antecedente ASTM C566-89.*
- ICONTEC. (1998). *NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 4483 Ingeniería civil y arquitectura. Concretos. Método de ensayo para determinar la permeabilidad del concreto al agua.*
- Krishnan, S., Gopala Rao, D., & Bishnoi, S. (2020a). *Calcined Clays for Sustainable Concret* (pp. 125–130). [https://doi.org/10.1007/978-981-15-2806-4\\_14](https://doi.org/10.1007/978-981-15-2806-4_14)
- Krishnan, S., Gopala Rao, D., & Bishnoi, S. (2020b). *Why Low-Grade Calcined Clays Are the Ideal for the Production of Limestone Calcined Clay Cement (LC3)* (pp. 125–130). [https://doi.org/10.1007/978-981-15-2806-4\\_14](https://doi.org/10.1007/978-981-15-2806-4_14)
- Maraghechi, H., Avet, F., & Scrivener, K. (2018). Chloride transport behavior of LC3 Binders. *RILEM Bookseries, 16*. [https://doi.org/10.1007/978-94-024-1207-9\\_49](https://doi.org/10.1007/978-94-024-1207-9_49)
- Martirena, J. F., & Scrivener, K. (2019). Hacia la sostenibilidad en la producción de cemento en américa latina. *Cemento y Concreto En Iberoamérica y El Caribe*, 92–97. <https://www.ficem.org/revista-concreto-y-cemento-2019/index.html#p=92>
- Material Advanced Services. (2015, November). *Material Advanced Services*.
- Mehta, P. K. (1991). Durability of concrete - Fifty years of Progress? *ACI SP-126*, 1–31.
- MS SHETTY, & AK JAIN. (1982). *Concrete Technology, Theory and practice*.
- Muñoz López, K. L. (2020). *Metodología para la evaluación del potencial de producción de cementos tipo LC3 en el contexto Colombiano. Aproximación teórica*. UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA.
- Nguyen, Q. D., Afroz, S., & Castel, A. (2020). Influence of clay calcination method on the mechanical properties and chloride diffusion resistance of limestone calcined clay cement (LC3) concrete. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(5). <https://doi.org/10.3390/JMSE8050301>
- Nordtest. (1999). *NT BUILD 492 concrete, mortar and cement-based repair materials: chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments*.

NTC-5551. (2007). *NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 5551 Concretos. Durabilidad de estructuras de concreto.*

Olivier, J. G. J., Janssens-Maenhout, G., Muntean, M., & Peters, J. (2016). Trends in Global CO2 Emissions: 2016 Report; PBL Netherlands Environmental Assessment Agency: The Hague. *PBL Netherlands Environmental Assessment Agency & European Commission's Joint Research Centre (JRC)*, 86. [https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2016-trends-in-global-co2-emissions-2016-report-2315\\_4.pdf](https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2016-trends-in-global-co2-emissions-2016-report-2315_4.pdf)

ONU. (2015). *Acuerdo de París.*

Prensa Latina. (2021). *El LC3 es el futuro de la industria del cemento, afirma su creador.* <https://www.prensa-latina.cu/tags/martirena>

Ramezaniapour, A. A., Zolfagharnasab, A., Yadak Yaraghi, A., Bahman-Zadeh, F., & Ramezaniapour, A. M. (2020). Mechanical properties and durability of concretes containing calcined clays and limestone powder. *Proceedings of the Fib Symposium 2020: Concrete Structures for Resilient Society.*

Ruíz Rosa, Y., Rosa Domínguez, E. R., Sánchez Berriel, S., Castillo Hernández, L., Martirena Hernández, J. F., & Suppen Reynaga, N. (2017). Análisis de ecoeficiencia de la producción de cementos de bajo carbono mediante la sustitución de clinker / Eco-efficiency analysis of low-carbon cement production by replacing clinker. *Centro Azúcar*, 44(December).

Salazar Mayorga, L. F. (2023). *Evaluación de la resistencia a la corrosión debida a carbonatación en concretos con cemento pórtland adicionados con caliza y arcilla calcinada.*

Scrivener, K., Avet, F., Maraghechi, H., Zunino, F., Ston, J., Hanpongpun, W., & Favier, A. (2018). Impacting factors and properties of limestone calcined clay cements (LC3). *Green Materials*, 7(1), 3–14. <https://doi.org/10.1680/jgrma.18.00029>

Scrivener, K., Martirena, F., Bishnoi, S., & Maity, S. (2018). Calcined clay limestone cements (LC3). In *Cement and Concrete Research* (Vol. 114, pp. 49–56). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.017>

- Shah, V., & Bishnoi, S. (2018). Carbonation resistance of cements containing supplementary cementitious materials and its relation to various parameters of concrete. *Construction and Building Materials*, *178*, 219–232. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.162>
- Sharma, M., Bishnoi, S., Martirena, F., & Scrivener, K. (2021). Limestone calcined clay cement and concrete: A state-of-the-art review. *Cement and Concrete Research*, *149*. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106564>
- Torrent, R. J., Neves, R. D., & Imamoto, K. (2022). *concrete permeability and durability performance from theory to field applications*. <https://www.routledge.com/series-title/book-series/MCT>
- Zunino, F., Martirena, F., & Scrivener, K. (2021). Limestone calcined clay cements (lc3). *ACI Materials Journal*, *118*(3), 49–60. <https://doi.org/10.14359/51730422>