

**“EVALUACIÓN DEL EFECTO SOBRE LA VELOCIDAD DE PULSO
ULTRASÓNICO DE LA PRESENCIA DE CLORUROS EN CONCRETO SIN
REFUERZO”**

**JOHN JAIRO NIÑO GOMEZ
DIEGO ARMANDO ULLOA RANGEL**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE LOS MATERIALES
BUCARAMANGA**

2011

**“EVALUACIÓN DEL EFECTO SOBRE LA VELOCIDAD DE PULSO
ULTRASÓNICO DE LA PRESENCIA DE CLORUROS EN CONCRETO SIN
REFUERZO”**

**JOHN JAIRO NIÑO GOMEZ
DIEGO ARMANDO ULLOA RANGEL**

**Trabajo de investigación, presentado como requisito de grado para optar al
título de Ingeniero Metalúrgico**

**Directora
M.Sc LUZ AMPARO QUINTERO**

**Co-Director
Ph.D RICARDO ALFREDO CRUZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE LOS MATERIALES
BUCARAMANGA**

2011

A Dios en primera instancia por permitirme vivir, sentir y compartir con tanta gente el milagro de existir.

A mis padres por tan valioso esfuerzo que realizaron para que yo pudiera estar donde estoy, mi madre, por sus valiosos consejos, regaños, enseñanzas, alegrías y sentimientos transmitidos, a mi padre por su enseñanza vivencial, su humildad, tranquilidad, emprendimiento, verraquera, alegría y buen sentido del humor.

A mi tío Hernando, a quien admiro y quien siempre fue mi consejero.

A mi novia, por su apoyo incondicional y por su agradable y comfortable compañía.

Al grupo de música y danzas afrocolombianas MACONDO, mi segunda familia, desde el maestro hasta el más nuevo, a CHAMBAKUVACAN, por la oportunidad para seguir conectado al folclor a pesar de las circunstancias. Danzas: Bagarozza, Johnky, la profe Silvia, Carmela, Zumbambica, Carlos, Marlon, Nadia, Diana, Adry, Pope, Wilfrank, Andrea. Musica: Ivan, Brandon, Will, Julian, Demoño, Yira, Paola.

A Kuisitambo: Maritza, Fabio, Lauras3, Munuel, Karoll, Pipe, Dony, Richy y Carlos.

Al departamento de recreación y deportes de Comfenalco Santander y al mejor staff de recreadores del oriente Colombiano, a mi parche de desparche, Silvia, Laura, Nelson, Cindy Jackson, Egu, Pescao, Titto, Pato, TATTAN, Checho, Ivon.

A los parces de metalúrgica: Diego Ulloa, Erminson, Yas, David no Gasto, John T, John C, Las Compas Jenny y Andrea, Juanito, Lucho, Yura, Florez, Yuleiny, Leo y Fabian.

A los amigos de carrera de siempre, Henry, Lu, Caro, Juangui, La cucu y Gafaro. Bueno y por ultimo a los que se me escaparon, pero que siempre estuvieron hay cuando los necesitamos, como la mechuda de civil, y en general a los que siempre me dieron sus buenos deseos y energías.

Y por ultimo a mi compañero de proyecto por su acompañamiento tan vizaje en esta investigación.

JOHN JAIRO NIÑO GOMEZ

“No puede haber crecimiento en solitario” (Anónimo)

Mi respeto y gratitud:

A mi Padre FABIO por enseñarme a perseverar en medio de la adversidad y ser honesto por encima de todo. Por apoyarme todos estos años en medio de múltiples circunstancias y por confiar en mí de manera sencilla y real, pido a Dios que te bendiga enormemente cada día de tu vida. ¡Eres mi ejemplo a seguir hasta el fin!

A mi Hermano LEONARDO por su generosidad y afecto, quien fruto de su manera de ser me ha permitido aprender a ser más tranquilo, a tener confianza y hermandad para llegar a vivir feliz.

Mil bendiciones a diario. ¡Persevera por lo que quieres!

A mi Novia LAURA por tantos momentos vividos, los cuales me han permitido conocer y sentir la belleza de la última gran creación de Dios: La mujer. Gracias por tu amor incondicional, tus detalles, sencillez y nobleza. Por la gracia que fluye de tu ser, Dios te guarde siempre. ¡Te quiero mi lala!

A mis amigos más queridos: John Jairo, Yurany, Javier Morantes, Giovanni, Floren, Camilo, Julian (El Topo), Cristian, Cayita, Carolina (La Pollo), David, Oscar (Chavo), Harrison, Juan Ricardo (Vagales), Carlos, Juan Manuel, Javier (Juanito), Jenny Carolina (Cuchumina), Andrea (Cocorota), Angie, Lili Ortiz, Javier Atuesta, William, Laura Cañas, Yanid, Caro Castillo, Edwin, Leonardo, Pily, Jaime, Reynaldo, Manuel, Layla, Dianita, Esteban y Viviana, Luis y Silvia, Erminsson y Nancy, Julio y Vivian, Alex y Julie, John y Andrea, Juanguí, Edilson, Ronald, Fabian, Yazmin y Eliecer. Les recordaré siempre como personas excepcionales y amigos incondicionales.

A mi querida Paty Casas y mis queridos amigos de Tunart-UIS: Alejandra, Laura, María Claudia, Andrea, Paola, Rodrigo, Ricardo, Leonardo, Sergio, John Smith, Jenny, Luz Adriana, Milena, Carolina, Jose, Alvaro, Jaime y Jahir. Compartir con ustedes el arte de la tunería será siempre un privilegio. Aupa!

A mis amigos queridos: Natalia Espitia, David Jonathan (Chisguero) y Andrés Marulanda (Marulo: El Rey del Metal). A Ruth Zarate por la confianza brindada. A mi familia por el aliento en los momentos de dificultad.

En especial:

A mi Madre GENNY: Grande, sabia y amorosa. Fuente de amor eterno, magnífica, hermosa, cálida y suave. Tú presencia siempre me fortaleció de manera abundante y cada paso positivo que he podido dar en esta vida estuviste allí como un ángel guardándome. Nunca te fuiste. Te recuerdo siempre con alegría, tranquilidad, afinidad y ternura. ¡Te amé, te amo y te amaré por siempre mi bella ángel de amor!

A mi Señor JESUCRISTO: Máxima fuente de sabiduría y amor. A ti, por quien vivo, respiro y por quien fui, soy y llegaré a ser en esta vida. A ti quien eres mi máxima inspiración y punto de referencia. A ti la mayor dedicatoria de este trabajo. A ti, a quien amo. A ti la gloria hasta el fin del fin. AMÉN.

DIEGO ARMANDO ULLOA RANGEL

AGRADECIMIENTOS

A la universidad industrial de Santander por habernos permitido entrar en su comunidad universitaria.

A nuestra directora Ms.C Luz Amparo Quintero, por su apoyo incondicional, por su paciencia y por brindarnos la confianza necesaria para el desarrollo de este proyecto.

A nuestro codirector Ph.D Ricardo Cruz por apoyarnos y darnos el conocimiento necesario para poder realizar este proyecto.

A la escuela de ingeniería metalúrgica a sus profesores y técnicos como Ambrosio, Mario, Javier y Domingo por brindarnos los elementos necesarios en nuestra formación profesional.

A la escuela de ingeniería civil, por proporcionarnos sus instalaciones y los materiales empleados en esta investigación. Al técnico Jairo Hernández por su colaboración y amistad.

A Julián Herrera por aportarnos todos sus conocimientos en ingeniería civil, por su colaboración y apoyo.

Por último a nuestras familias por creer en nosotros, por apoyarnos y por su amor incondicional.

TABLA DE CONTENIDO

	Pag.
INTRODUCCIÓN	20
1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	20
1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	21
1.2 ESTADO DEL ARTE.....	23
1.3 OBJETIVOS.....	26
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	26
1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	26
2. MARCO TEÓRICO	27
2.1 EL CONCRETO	27
2.2 COMPONENTES DEL CONCRETO	27
2.2.1 Cemento	27
2.2.2 Agua	28
2.2.3 Agregados.....	29
2.2.4 Relación Agua – Cemento	29
2.2.5 Inclusión de Aire	30
2.3 REACCIÓN DE LOS IONES CLORURO.....	31
2.4 LA DIFUSION DE IONES CLORURO	34
2.5 VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO	35
2.5.1 Generalidades de la técnica.....	35
2.5.2 Modalidad de Transmisión del Ultrasonido	36
2.5.3 Factores a tener en cuenta en la Velocidad de Pulso Ultrasónico	38
3. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	40
3.1 REVISION BIBLIOGRÁFICA	41
3.2 FABRICACIÓN DE MUESTRAS DE CONCRETO	41
3.2.1 Caracterización de la Materia Prima	42

3.2.2	Diseño de Mezcla	43
3.2.3	Elaboración de probetas	43
3.2.3	Fraguado y curado de las probetas	48
3.3	CAPACITACIÓN	49
3.4	ENSAYOS EXPERIMENTALES	52
3.4.1	ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	52
3.4.2	ENSAYOS DESTRUCTIVOS.....	56
3.5	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	59
3.6	ELABORACIÓN DEL INFORME FINAL.....	60
4.	RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS	61
4.1	FABRICACIÓN DE MUESTRAS DE CONCRETO	61
4.1.1	Caracterización de la Materia prima	61
4.1.2	Diseño de Mezcla	65
4.2	ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	66
4.2.1	Inspección Visual	67
4.2.2	Velocidad de Pulso Ultrasónico	68
4.3	ENSAYOS DESTRUCTIVOS.....	77
4.3.1	Resistencia a la Compresión	78
4.3.2	Difracción de Rayos X.....	84
4.3.3	Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X de Energía Dispersiva.....	86
5.	CONCLUSIONES	90
6.	RECOMENDACIONES.....	92
	BIBLIOGRAFÍA.....	93
	ANEXOS.....	98

LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1. Clasificación del cemento según la norma ASTM C 150.....	28
Tabla 2. Límites de iones cloruro en el concreto antes de su exposición en servicio (según recomendaciones de ACI).....	33
Tabla 3. Cantidades representativas para un diseño de mezcla de 1 m ³	43
Tabla 4. Kilogramos de NaCl calculados para un diseño de mezcla por el método A.C.I. para 1 m ³ de concreto.	47
Tabla 5. Especificaciones técnicas del cemento ARGOS Portland Tipo I.....	62
Tabla 6. Caracterización de los agregados fino y grueso.....	62
Tabla 7. Distribución granulométrica del agregado fino.	63
Tabla 8. Calidad fisicoquímica y microbiológica promedio mensual del agua tratada para consumo humano del A.M.B.	64
Tabla 9. Características fisicoquímicas de la sal REFISAL ALTA PUREZA	65
Tabla 10. Diseño de mezcla para una probeta cúbica.....	66
Tabla 11. Diseño de mezcla para una probeta cilíndrica.	66
Tabla 12. Promedios de velocidad y desviación estándar de mediciones de velocidad de pulso ultrasónico en probetas cubicas de 20cm ³	69
Tabla 13. Promedios de velocidad y desviación estándar de mediciones de velocidad de pulso ultrasónico en probetas cilíndricas con diámetro 10 cm y longitud 20 cm.	70
Tabla 14. Resultados de ajustar un modelo de doble raíz cuadrada para describir la relación entre la VPU y el % NaCl en probetas cilíndricas a los 28 días de curado.	75
Tabla 15. Resistencia a la compresión a los 28 días, probetas cilíndricas.	78
Tabla 16. Fases presentes en muestra con 0,0 % de NaCl.	84
Tabla 17. Fases presentes en muestra con 1,5 % de NaCl.	85
Tabla 18. Fases presentes en muestra con 2,5 % de NaCl.	85

Tabla 19. Análisis del cemento por la Técnica de Espectrometría de Fluorescencia de Rayos-X de Energía Dispersiva.	86
Tabla 20. Porcentaje de Cloro encontrado en la muestra con %NaCl de 1,5%.	87
Tabla 21. Porcentaje de Cloro encontrado en la muestra con %NaCl de 2,5%.	88

LISTA DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1. Proceso de elaboración del concreto.....	28
Figura 2. Componentes del concreto con o sin aire incluido.....	30
Figura 3. Ataque generalizado de los iones cloruro tanto en la matriz de concreto como en el refuerzo.....	31
Figura 4. Esquema de las tres formas en las cuales se presenta el cloro en la estructura de concreto.....	32
Figura 5. Posición de los palpadores en cada modalidad de transmisión directa (A), Semi-Directa (B), e Indirecta (C).....	37
Figura 6. Diagrama de flujo de la metodología para el desarrollo del proyecto.	40
Figura 7. Instrumentación utilizada para la elaboración de las probetas.....	44
Figura 8. Formaleta para probetas de 20 cm ³	44
Figura 9. Moldes plásticos de uso industrial para el fraguado de las probetas cilíndricas.....	45
Figura 10. Mezcla de cemento, agregado grueso y arena.....	46
Figura 11. Mezcla entre el cemento, arena, agregado grueso y agua con adición de NaCl.....	46
Figura 12. Apisonado de la mezcla con varilla compactadora.....	48
Figura 13. Curado por 24 horas en el molde.....	49
Figura 14. Equipo de Ultrasonido de Baja Frecuencia marca CMS Farnell Limited Tipo PUNDIT PLUS Modelo PC1006.....	50
Figura 15. Palpadores del Equipo de Ultrasonido puestos en posición para modo de transmisión directa.....	50
Figura 16. Calibrador digital marca UPM (United Precision Machine, Inc).....	51
Figura 17. Maquina Universal de Ensayos AMSLER (Alfred J. Amsler y Cia).....	52
Figura 18. Desencofrado de las probetas cilíndricas.....	53
Figura 19. Cuadrícula para la toma de tiempos de vuelo de las probetas de 20 cm ³	54

Figura 20. Posiciones de lectura para probetas cilíndricas.....	55
Figura 21. Obtención de la matriz de las diferentes probetas.....	58
Figura 22. Macerado para obtención del polvo de las probetas.....	58
Figura 23. Malla 100 U.S.A. STANDARD TESTING SIEVE.....	59
Figura 24. Probetas cúbicas y cilíndricas sin cambios dimensionales.....	67

LISTA DE GRAFICAS

	Pag.
Gráfica 1. VPU respecto al porcentaje de NaCl a los 7 y 28 días de curado, para probetas cúbicas.	71
Gráfica 2. VPU respecto al porcentaje de NaCl a los 7 días de curado, para probetas cilíndricas.	72
Gráfica 3. VPU respecto al porcentaje de NaCl a los 14 días de curado, para probetas cilíndricas.	73
Gráfica 4. VPU respecto al porcentaje de NaCl a los 28 días de curado, para probetas cilíndricas.	73
Gráfica 5. Ajuste de modelo doble raíz cuadrada para describir la relación entre la VPU y el % NaCl en probetas cilíndricas a los 28 días de curado.	74
Gráfica 6. VPU respecto al porcentaje de NaCl para los 7, 14 y 28 días de curado de probetas cilíndricas.	76
Gráfica 7. Comportamiento de % NaCl Vs VPU en probetas cubicas a los 7 y 28 días y cilíndricas a los 7, 14 y 28 días de curado.	77
Gráfica 8. Resistencia a la compresión con respecto al contenido de NaCl a los 28 días de curado de probetas cilíndricas.	79
Gráfica 9. Ajuste de modelo polinómico grado dos para describir la relación entre la resistencia a la compresión y el % NaCl en probetas cilíndricas a los 28 días de curado.	80
Gráfica 10. %NaCl Vs VPU y Resistencia a la compresión promedio.	81
Gráfica 11. VPU Vs Resistencia a la compresión a los 28 días de curado de probetas cilíndricas.	82
Gráfica 12. Ajuste de modelo polinómico de orden dos para describir la relación entre la resistencia a la compresión y la velocidad de pulso ultrasónico en probetas cilíndricas a los 28 días de curado.	83

LISTA DE ANEXOS

	Pag.
ANEXO A. Cálculos para el diseño de mezcla	98
ANEXO B. Resultado del Análisis de Difracción de Rayos X	109
ANEXO C. Resultado del Análisis de Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X de Energía Dispersiva	115
ANEXO D. Tablas de medición de tiempos de vuelo y longitudes promedio para probetas Cúbicas y Cilíndricas	117
ANEXO E. Ficha Técnica del compuesto químico Hidrocalumita	123
ANEXO F. Ficha Técnica de la sal REFISAL ALTA PUREZA	124
ANEXO G. Ficha Técnica Especificaciones Técnicas del Cemento ARGOS Portland Tipo I	125

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN DEL EFECTO SOBRE LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO DE LA PRESENCIA DE CLORUROS EN CONCRETO SIN REFUERZO.*

AUTORES: NIÑO GOMEZ, John Jairo. ULLOA RANGEL, Diego Armando **

PALABRAS CLAVES: concreto, cloruro, velocidad de pulso ultrasónico, resistencia a la compresión.

RESUMEN

Esta investigación evaluó la velocidad de pulso ultrasónico (VPU), en probetas cúbicas y cilíndricas de concreto sin refuerzo elaboradas con adiciones de NaCl en el agua de fabricación respecto al peso del cemento utilizado, fabricadas con un diseño de mezcla establecido y curadas en seco durante 28 días. Se realizó inspección visual para verificar cambios superficiales, se tomaron lecturas de la velocidad de pulso ultrasónico y se determinó la resistencia a la compresión en un total de 32 probetas de concreto sin refuerzo, distribuidas en 16 probetas cilíndricas con concentraciones de cloruro de 0.0%, 0.8%, 1.5% y 2.5%, y 16 probetas cúbicas con la mismas condiciones anteriormente descritas. La medición de velocidad de pulso ultrasónico se realizó a los 7, 14 y 28 días de curado para las probetas cilíndricas y en los días 7 y 28 para las probetas cúbicas. Además se realizaron pruebas de difracción y fluorescencia de rayos x relacionando la velocidad de pulso ultrasónico, la resistencia a la compresión y el porcentaje de cloruro adicionado. Se hallaron correlaciones y se establecieron los cambios con respecto al porcentaje de NaCl, para así tener el efecto de la presencia del ion cloruro sobre la VPU y estimar la resistencia a la compresión a través de ensayos no destructivos.

*Trabajo de investigación

**Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, Directora: M.Sc. Luz Amparo Quintero. Co director: Ph.D. Ricardo Alfredo Cruz.

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF THE EFFECT ON ULTRASONIC PULSE RATE IN THE PRESENCE OF CHLORIDE IN CONCRETE WITHOUT REINFORCEMENT.*

AUTHORS: NIÑO GOMEZ, John Jairo. ULLOA RANGEL, Diego Armando **

KEYWORDS: concrete, chloride, ultrasonic pulse velocity, compressive strength.

ABSTRACT

In this research the ultrasonic pulse velocity (UPV) was evaluated in cubic and cylindrical specimens of unreinforced concrete made with the addition of NaCl into the water of production, replacing the used cement weight. The specimens were made from a mixture design previously set and they were dry cured for 28 days. Visual inspection was performed to verify superficial changes. Measurements of ultrasonic pulse velocity and compressive strength were taken in a total of 32 unreinforced concrete specimens distributed in 16 cylindrical samples with chloride concentrations of 0.0%, 0.8%, 1.5% and 2.5%, and 16 cubic specimens with the same conditions described before. The measurement of ultrasonic pulse velocity was performed at 7, 14 and 28-day curing period for cylindrical samples and 7 and 28-day curing period for cubic specimens. X-ray diffraction and X-ray fluorescence Tests were also carried out to relate ultrasonic pulse velocity, compressive strength and the percentage of added chloride. Correlations were found and some changes were settled according to the percentage of NaCl in order to have the effect of the chloride ion on the UPV and estimate the compressive strength by nondestructive testing.

*Research Work.

** Faculty of Physical Chemistry Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Director: M.Sc. Luz Amparo Quintero. Co director: Ph.D. Ricardo Alfredo Cruz.

INTRODUCCIÓN

El concreto es el material de construcción más utilizado en el mundo, que se trabaja en forma de pasta semi-líquida, por lo que puede adoptar casi cualquier forma [1].

La presencia de cloruros en el concreto puede ser nociva para la vida útil de la estructura, generando una forma de corrosión interna que ataca el refuerzo generando picadura y posteriormente alterando las dimensiones del concreto para finalmente generar fisuras y desprendimiento.

El efecto de los cloruros en el concreto sin refuerzo puede mejorar, en algunos casos, sus propiedades mecánicas aunque estas atribuciones aún se encuentran en estudio.

En esta investigación se hace uso de ensayos no destructivos (inspección visual y velocidad de pulso ultrasónico) y destructivos (resistencia a la compresión, difracción y fluorescencia de rayos X) para evaluar el efecto de la presencia de cloruros en concreto sin refuerzo.

1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La presencia de sales marinas en la matriz del concreto resulta tan significativa como el caso de la corrosión en los refuerzos internos del concreto en servicio, debido a que produce daños invisibles que causan modificaciones en la estructura, que podrían ser la razón de fallas futuras como es el caso de la exposición al ambiente marino [2].

En el concreto en contacto permanente o intermitente con agua de mar, los sulfatos y cloruros pueden penetrar por porosidad, capilaridad, ósmosis y difusión. Los cloruros, si llegan hasta la armadura, causan una despasivación de ésta y provocan la corrosión del refuerzo [3].

Debido a que el grado de afectación no es igual, las estructuras en ambiente marino pueden clasificarse según su ubicación y las condiciones agresivas del medio, en las siguientes zonas cuya delimitación no puede definirse concretamente: Zona de inmersión, marea, salpicaduras y ambiente marino.

En la zona de inmersión, el concreto es capaz de protegerse así mismo de la corrosión por la débil concentración de oxígeno en el agua, que impide la actividad corrosiva del ion cloruro. Además, la penetración del agua se presenta por succión capilar ingresando sustancias como el cloruro y los sulfatos [2].

En la zona de marea, el concreto puede sufrir fisuras que adelanten la corrosión por efecto de impacto o por la acción de las olas del mar. Se presenta la misma succión capilar anteriormente descrita sin difusión de gases.

La zona de salpicaduras se ubica por encima del nivel de marea alta, siendo constantemente propensa a salpicaduras de las olas y el baño de espuma. Se

presentan constantes ciclos de humidificación y secado, en donde el ión cloruro penetra la estructura por difusión (ciclo húmedo), mientras que en el ciclo de secado se elimina el agua excesiva, pero el concreto retiene el cloruro.

Cuando el concreto no está en contacto con el agua de mar, recibe sales procedentes de la brisa marina y la niebla salina, produciendo fallas como fisuras, grietas y desprendimiento del revestimiento, incluso dañando invisiblemente la estructura disminuyendo así, su sismo-resistencia [4]. Este daño ocurre en la zona de ambiente marino.

Por lo anterior, determinar la presencia y profundidad de iones cloro en estructuras de concreto es de vital importancia, pero es un proceso de riguroso cuidado, ya que al utilizar una técnica destructiva, en su realización podría afectar las propiedades mecánicas, inicialmente en pequeñas proporciones pero con el tiempo se podría estar generando un daño significativo.

Una alternativa de corrección del problema es la extracción de cloruros por lixiviación, la cual depende del tiempo durante el cual las muestras estén en contacto con los medios electroquímicos y la temperatura.

Sin embargo, se han encontrado inconsistencias para probetas con 1% de cloruro respecto a probetas con 2,5%, donde el porcentaje recolectado para el segundo caso fue menor que el esperado [5].

Algunas investigaciones [4][2] han encontrado que no solo el contenido de cloruro, sino también otros parámetros como el tipo de cemento y la fuente de cloruro (añadida o externa) tienen que ser conocidos para seleccionar un procedimiento de extracción preciso [4].

Algunas otras alternativas de solución para la extracción de cloruros han sido estudiadas, pero tampoco han mostrado resultados que pudieran ser satisfactorios [4], [6].

Por todo lo anterior, es importante el análisis de muestras con contenidos de cloruro por medio de la técnica de velocidad de pulso ultrasónico para conocer el efecto del ion cloruro en el concreto y encontrar una relación entre la VPU y la resistencia a la compresión.

1.2 ESTADO DEL ARTE

La necesidad de encontrar una alternativa para evaluar el estado del concreto en servicio en zonas expuestas a la presencia de cloruros, ha llevado a ingenieros de todo el mundo a investigar sobre posibles técnicas y metodologías no destructivas que permitan obtener información veraz sobre el estado del concreto.

La A.C.I. (American Concrete Institute) entre otros autores, recomiendan la técnica de velocidad de pulso ultrasónico para determinar las propiedades físicas y condiciones internas del concreto, pudiendo esta última detectar diferencias entre concretos fabricados con elementos extraños o expuestos a ambientes que puedan invadir y penetrar su estructura interna. La velocidad de pulso ultrasónico se empezó a utilizar para evaluar materiales y estructuras de concreto gracias a su simplicidad, versatilidad y repetitividad [7].

Leslie y Cheesman [8] desarrollaron la técnica de medición de velocidad de pulso ultrasónico como medio de diagnóstico para conocer el estado del concreto, siendo utilizada desde hace aproximadamente 60 años, utilizado en cortinas de presas.

Chavez y Buendía [9], demostraron que el medio ambiente alcalino del concreto crea una capa de pasivación sobre la superficie, protegiéndolo de reacciones químicas adicionales. Expresaron que la concentración de cloruros aumenta a medida que el tiempo de curado es mayor particularmente en las zonas más cercanas a la superficie, por lo que es posible predecir la conducta de los iones cloruro si se cumpliera las condiciones de la segunda ley de Fick en las probetas de concreto.

Garbozzi y Bentz [10] investigaron la relación entre la difusión de cloruros y la permeabilidad del concreto a diferentes relaciones y volúmenes de arena. Calcularon los coeficientes de difusión experimentalmente, comparándolos mediante simulación por software, basada en la segunda ley de Fick, concluyendo que los coeficientes de difusión en períodos relativamente cortos varían del 4 al 7% entre los valores experimentales y los valores de simulación.

González y Santana [11], desarrollaron un modelo de difusión de iones cloruro en una estructura de concreto y confirmaron que el coeficiente de difusión depende del contenido de cloruros en la superficie del concreto. Los resultados obtenidos contribuyeron al análisis real del comportamiento de los iones cloruro difundidos en las probetas del concreto.

Teniendo en cuenta lo dicho anteriormente, García [12] y otros, utilizaron la microsílíce como adición puzolánica en mezclas de concreto causando un efecto favorable sobre la permeabilidad y porosidad, ya que esta adición se ubica en los poros que están conectados con el exterior obstruyendo el paso de agentes agresivos, es decir, modificando la porosidad y disminuyendo el coeficiente de difusión aparente.

Angst, Elsener, Larsen y Vennesland afirman que la adición de cloruros en forma de NaCl en la mezcla es rápida y lleva a una distribución homogénea y bien

definida del contenido total de cloruro [13]. Afirman que esta distribución beneficia la cuantificación de la concentración de cloruros.

Quintero, Peña y Toloza demostraron que la extracción electroquímica de cloruros en concretos es posible hasta un 80% [14].

Muchos investigadores han encontrado una relación existente entre la resistencia a la compresión y la velocidad de pulso ultrasónico en el concreto, lo cual permite considerar a ésta técnica podría ser una buena alternativa para el estudio de la difusión de iones cloruro en estructuras de concreto, relacionando los cambios de velocidad de pulso ultrasónico con el cambio en la resistencia a la compresión de las probetas expuestas a un ambiente rico en iones cloruro como es el caso del agua con NaCl.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

- Evaluar el efecto sobre la velocidad de pulso ultrasónico de la presencia de iones cloruro en concreto sin refuerzo.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Evaluar el efecto de la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión en muestras de concreto preparadas con concentraciones de iones cloro de 0%, 0.8%, 1.5% y 2.5% del peso del cemento.
- Evaluar el efecto sobre la velocidad de pulso ultrasónico de la variación de concentración de iones cloruro en una matriz de concreto sin refuerzo previamente preparada.
- Establecer relaciones entre los resultados obtenidos de la resistencia a la compresión y la velocidad de pulso ultrasónico.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 EL CONCRETO

Este material está compuesto por la mezcla de 3 componentes fundamentales como lo son: cemento, agregados (arena y gravas), y finalmente agua. El producto de esta combinación de materiales forma una pasta húmeda y consistente que tiene la capacidad de fraguar y adquirir dureza al contacto con el agua, esto es debido a una reacción química de hidratación dada entre los dos.

Posterior al tiempo de fraguado y curado, la pasta húmeda se transforma en una aglomeración dura, resistente y durable. La función de los agregados es servir como relleno transformando la pasta en un material más fuerte y menos costoso [15].

2.2 COMPONENTES DEL CONCRETO

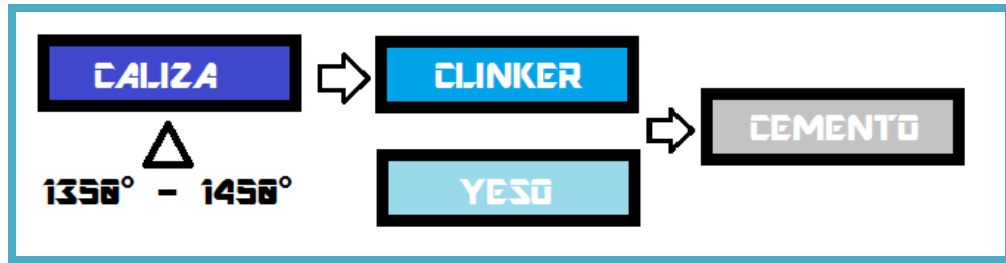
El concreto utilizado en diversos proyectos urbanos y arquitectónicos entre otros, surge a partir de los siguientes componentes:

2.2.1 Cemento

El cemento se define como una sustancia de polvo fino hecha de argamasa de yeso capaz de formar una pasta blanda al mezclarse con el agua y que se endurece espontáneamente en contacto con el aire.

El cemento Portland de características hidráulicas, se obtiene a partir de la producción de Clinker (obtenido al calcinar arcilla y caliza a temperaturas de entre 1350 y 1450°C aproximadamente), y posterior a ello se añade el yeso junto al Clinker recién formado en molinos para obtener como producto final el cemento [3]. (ver Figura 1)

Figura 1. Proceso de elaboración del concreto.



Fuente: Los autores.

La norma ASTM C 150 [16], establece 8 tipos diferentes de cemento de acuerdo a los usos y necesidades del cliente (ver Tabla 1).

Tabla 1. Clasificación del cemento según la norma ASTM C 150.

TIPO	APLICACIÓN
I	Normal. Para uso general, donde no son requeridos otro tipo de cemento.
I A	Normal. Uso general, con inclusor de aire.
II	Moderado. Para uso general y además en construcciones donde existe un moderado ataque de sulfatos o se requiera un moderado calor de hidratación.
II A	Moderado. Igual que el tipo II, pero con inclusor de aire.
III	Altas resistencias. Para uso donde se requieren altas resistencias a edades tempranas.
III A	Altas resistencias. Mismo uso que el tipo III, con aire incluido.
IV	Bajo calor de hidratación. Para uso donde se requiere un bajo calor de hidratación.
V	Resistente a la acción de los sulfatos. Para uso general y además en construcciones donde existe un alto ataque de sulfatos.

Fuente: Norma ASTM C 150 [16].

2.2.2 Agua

Constituye el componente fundamental en la formación del concreto, pues es quien permite el desarrollo de su adhesión con el cemento. La cantidad de agua que se le añade se puede dividir en los porcentajes requeridos para la hidratación

del cemento y lo restante para fluidizar la pasta y permitir el mejor desempeño al añadir los agregados.

El agua utilizada en la elaboración del concreto debe ser apta para el consumo humano, libre de sustancias como aceites, ácidos, compuestos químicos, sulfatos, sulfuros y cloruros [17]. La presencia de cloruros puede llegar a tener un efecto en la resistencia a la compresión del concreto como en la velocidad de pulso ultrasónico.

2.2.3 Agregados

Se define como agregado al conjunto de partículas inorgánicas de origen natural o artificial cuyas dimensiones están comprendidas entre los límites fijados en la NTC 174 [18].

Los agregados finos son arenas naturales o manufacturadas con tamaños de partícula que pueden llegar hasta 10 mm; por el contrario, los agregados gruesos son aquellos que resultan retenidos en la malla No. 16 después del proceso de tamizado y que pueden variar sus tamaños hasta 152 mm [19].

2.2.4 Relación Agua – Cemento

La resistencia del concreto se determina por la relación agua/cemento, que expresa la relación existente entre el peso del agua y el peso del cemento utilizados. A la hora de constituir un diseño de mezcla, una relación agua/cemento baja resulta ideal debido a que se puede obtener las siguientes ventajas:

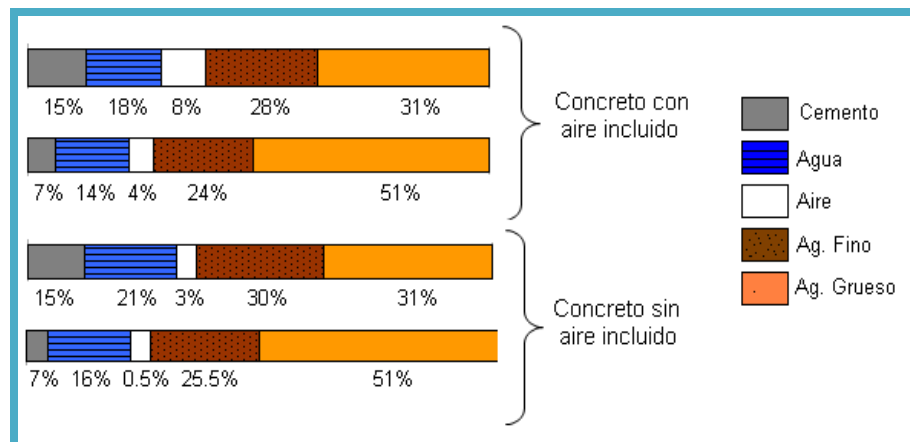
- Incrementar la resistencia a la compresión y a la flexión.
- Menor permeabilidad.
- Lograr una mejor unión entre capas sucesivas entre el concreto y el esfuerzo.
- Reducir las tendencias de agrietamientos por contracción.

El uso de agua contaminada con pequeñas porciones de NaCl puede contribuir a un aumento de la resistencia a la compresión del concreto [20]. Por otro lado, una gran cantidad de NaCl disuelta en el agua de preparación del concreto puede llegar a fragilizar su estructura interna y su resistencia a la compresión puede descender considerablemente [20].

2.2.5 Inclusión de Aire

En la elaboración del concreto existen proporciones determinadas para un concreto deseado. Para poder regular estas proporciones de aire en la mezcla de concreto se sugiere una buena compactación mediante vibración o leves golpes en la formaleta que la contiene. Los componentes del aire con o sin aire incluido y sus porcentajes se muestran en la Figura 2.

Figura 2. Componentes del concreto con o sin aire incluido.



Fuente: Tecnología del concreto y mortero [6].

Mediante la compactación del concreto, se logra un mayor contacto entre los granos de la mezcla para eliminar el aire atrapado como burbujas dentro de esta. Dependiendo de la cantidad de burbujas de aire atrapadas en la estructura, se ve involucrada la formación de cloruro físicamente adsorbido [4].

2.3 REACCIÓN DE LOS IONES CLORURO

En países como E.E.U.U. se ha evaluado en 200 millones de Dólares el costo anual de reparación de puentes [3]. En la mayoría de estos casos se presenta el fenómeno del daño inducido por iones cloruro que atacan el concreto y a su vez se desplazan llegando hasta el refuerzo de acero, generando una corrosión importante como se muestra en la Figura 3.

Figura 3. Ataque generalizado de los iones cloruro tanto en la matriz de concreto como en el refuerzo.



Fuente: IV COLOQUIO DE QUÍMICA DEL CEMENTO [3].

La presencia de cloruros en el concreto puede provenir de sus componentes: cemento, agregados, agua de mezcla y aditivos. Por otro lado, los iones de cloruro provenientes del entorno también pueden difundirse en el concreto a través de su estructura capilar, sus porosidades e incluso por medio de una atmosfera rica en iones cloruro como sucede con el agua de mar, la brisa marina y sustancias gaseosas de medios industriales [3].

Existen varias metodologías para evaluar la penetración de iones cloruro en una estructura de concreto como por ejemplo:

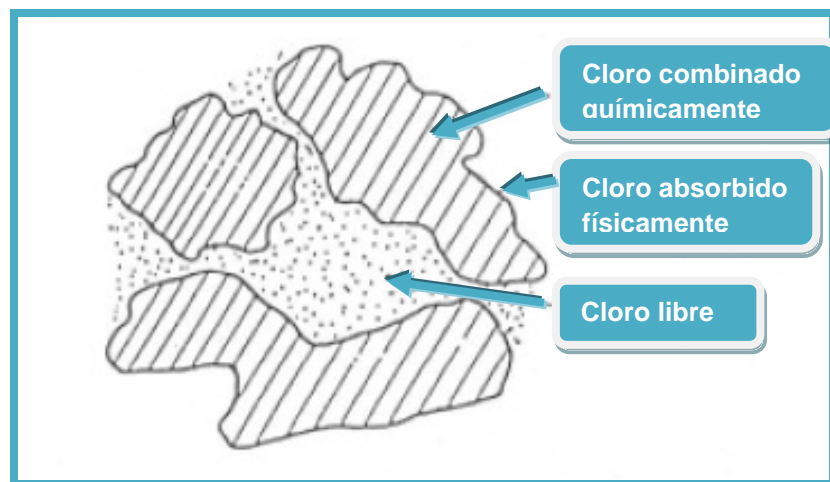
- Perfil de Concentración: en el cual se extraen muestras o núcleos de concreto a diferentes profundidades, y posteriormente se hace el análisis de la concentración del ion cloruro.

También se debe tener en cuenta el grado de inserción de los cloruros en la matriz de cemento y la forma como se aloja. A continuación se describe las tres formas que se pueden encontrar en la matriz del concreto (Figura 4):

- Combinado químicamente
- Absorbido físicamente
- Forma iónica (Cloro libre)

Únicamente la parte de cloruro no combinado es la responsable de la corrosión del refuerzo. Además, la experiencia afirma que aproximadamente el 0.4% del cloruro con respecto al peso del cemento puede llegar a combinarse en la matriz de concreto [3].

Figura 4. Esquema de las tres formas en las cuales se presenta el cloro en la estructura de concreto.



Fuente: IV COLOQUIO DE QUÍMICA DEL CEMENTO [3].

Consecuentemente para garantizar que las estructuras de concreto no se vean muy afectadas por la corrosión, se han optado regulaciones para limitar el contenido de cloruro presentes en la mezcla de concreto.

Como se puede notar en la Tabla 2 los comités ACI 222 y 318 establecen límites de iones cloruro en el concreto antes de su exposición en servicio.

Tabla 2. Límites de iones cloruro en el concreto antes de su exposición en servicio (según recomendaciones de ACI).

ACI 222R-01 Contenido máximo de iones cloruro (% peso del cemento)				ACI 318/318R-05 ASTM C1218 Contenido máximo de iones cloruro solubles en agua (Edad 28 a 42 días)	
	Solubles en ácido	Solubles en agua			Máximo contenido de iones cloruro (% peso del cemento)
CATEGORIA	ASTM C-1152	ASTM C-1218	Soxhlet*	TIPO DE MIEMBRO	
Concreto preesforzado	0.08	0.06	0.06	Concreto preesforzado	0.06
Concreto reforzado en condiciones húmedas	0.10	0.08	0.08	Concreto reforzado expuesto a cloruros durante el servicio	0.15
Concreto reforzado en condiciones secas	0.20	0.15	0.15	Concreto reforzado que estará seco o protegido de humedad durante servicio	1.00
				Otra construcción reforzada de concreto	0.30

Fuente: Actualización tecnológica – Cloruros y aditivos [21].

A pesar de la existencia de las anteriores regulaciones vigentes, no es una garantía de que se utilicen en la práctica.

2.4 LA DIFUSION DE IONES CLORURO

El concreto, pese a su apariencia de solido compacto, es perfectamente permeable a los fluidos debido a su estructura que contiene poros capilares y poros gel, que forman canalículos que poseen diversos grosores que están conectados a la superficie de la estructura de concreto.

En el concreto armado en contacto permanente o intermitente con agua de mar, los cloruros que se encuentra disueltos pueden penetrar la estructura por medio de 4 formas:

- Porosidad
- Capilaridad
- Ósmosis
- Difusión

En el último caso anteriormente nombrado, las cantidades de cloruro introducidas son considerablemente más elevadas.

La difusión de los iones cloruro en el concreto se reduce por la capacidad del cemento para combinarlo física o químicamente, en cuanto reacciona con los productos de hidratación.

Los componentes del cemento que reaccionan son:

- Aluminato tricálcico $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ (C3A) que forma cloro-aluminatos cálcicos de composición aproximada: $123 \text{ CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaC}_12\cdot 10\text{H}_2\text{O}$, reaccionando también el ferroluminato tetra cálcico, (C4FA) o $4\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ con la formación del cloro ferrito cálcico, de composición: $3\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot\text{CaC}_12\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ [2].

La fase inicial de la difusión está influenciada por una serie de factores, aun cuando la velocidad de penetración de cloruros depende de la densidad del concreto, de la capacidad de mezcla de los cloruros, de la concentración en la superficie y del mecanismo de transporte. Este parámetro es descrito por el coeficiente de difusión que evalúa la medida de la distribución del cloro en el concreto. La capacidad de mezcla del cloro depende a la larga del tipo de concreto usado, de la relación agua/cemento y de los aditivos que se agregan al concreto [9].

En el medio marino las formas de corrosión se deben a los iones cloruro difundidos a través de la estructura capilar del concreto. Esta contaminación proviene del agua de mar y la brisa marina.

2.5 VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO

En el campo de los ensayos no destructivos, la velocidad de pulso ultrasonido es una de las técnicas de inspección de mayor aplicación en la actualidad para la evaluación de estructuras de concreto.

De acuerdo con la norma ASTM C597 – 02 [22], la técnica de la velocidad de pulso ultrasónico en el concreto puede medir la calidad relativa y uniformidad interna del mismo.

2.5.1 Generalidades de la técnica

Por medio de la técnica se puede determinar el tiempo de vuelo, es decir, el tiempo que tarda una onda emitida por uno de los transductores del equipo en desplazarse por la estructura de concreto. Conociendo el tiempo de vuelo, podemos calcular la velocidad de esta pulsación, por medio de la ecuación (1) [23]:

$$V = L / t$$

(1)

Donde:

V = Velocidad de pulso ultrasónico

L = Longitud de la pieza de concreto

T = Tiempo de vuelo

La técnica de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) se basa en que los materiales sólidos conducen apropiadamente las ondas acústicas, por lo cual las ondas ultrasónicas, pueden llegar a reflejarse en las interfaces y discontinuidades internas del concreto [15].

El equipo de VPU trabaja con pulsaciones de onda longitudinal de baja frecuencia generadas por un transductor de tipo electro acústico que actúa como emisor transformando energía eléctrica en mecánica, que traspasa la pieza a analizar y es recibida por un receptor que actúa de manera opuesta recibiendo la energía mecánica y transformándola en eléctrica.

2.5.2 Modalidad de Transmisión del Ultrasonido

Teniendo en cuenta la geometría de la pieza a analizar, la técnica de velocidad de pulso ultrasónico permite 3 tipos de mediciones distintas. En la Figura 5, podemos contemplar la posición de los palpadores en cada modalidad de transmisión.

2.5.2.1 Modo de transmisión directo

Esta modalidad ofrece una máxima transferencia entre los palpadores debido a que la onda viaja en dirección normal a ellos y por tanto brinda una lectura más precisa. (ver Figura 5A)

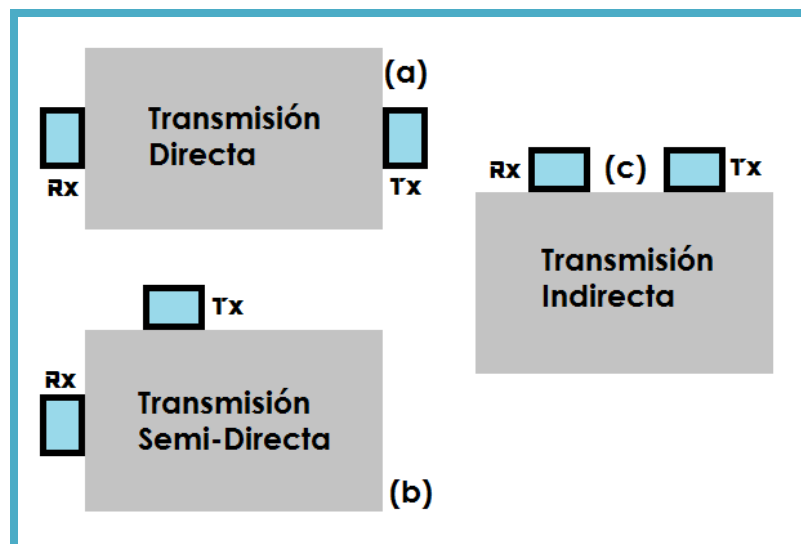
2.5.2.2 Modo de transmisión semi-directo

El método semi-directo puede ser a veces satisfactorio, si el ángulo entre los dos transductores no es superior a 90° , o si la longitud del recorrido no es demasiado larga. La sensibilidad de los transductores será menor y puede ocurrir que la señal recibida no sea clara a causa de la atenuación del impulso ultrasónico. La longitud de recorrido no se define bien dado al tamaño finito del transductor, pero es usual medir esta longitud desde el centro del emisor hasta el centro del receptor [24]. (ver Figura 5B)

2.5.2.3 Modo de transmisión indirecto

Esta modalidad permite la lectura de velocidades de pulso muy cercanas a la superficie de la pieza de concreto. La falencia de dicha modalidad radica en la incapacidad de conocer la respuesta al paso del pulso en zonas representativas de la pieza de concreto. (ver Figura 5C)

Figura 5. Posición de los palpadores en cada modalidad de transmisión directa (A), Semi-Directa (B), e Indirecta (C).



Fuente: Los autores.

En los materiales homogéneos, el efecto de la interacción de las ondas acústicas con los materiales es mejor cuando se tienen longitudes de onda muy pequeñas,

lo cual se traduce en altas frecuencias [24]. En el caso del concreto, debido a su alta heterogeneidad, es recomendado el uso de bajas frecuencias (50 y 200 KHz), las cuales proporcionan haces en longitudes de onda que permiten su evaluación.

2.5.3 Factores a tener en cuenta en la Velocidad de Pulso Ultrasónico

Al utilizar la técnica de velocidad de pulso ultrasónico sobre el concreto, se deben tener en cuenta factores tales como la edad de la pieza, el tipo de agregado, la humedad, la longitud de la pieza a evaluar y el ataque presente en su estructura interna [23], [25]:

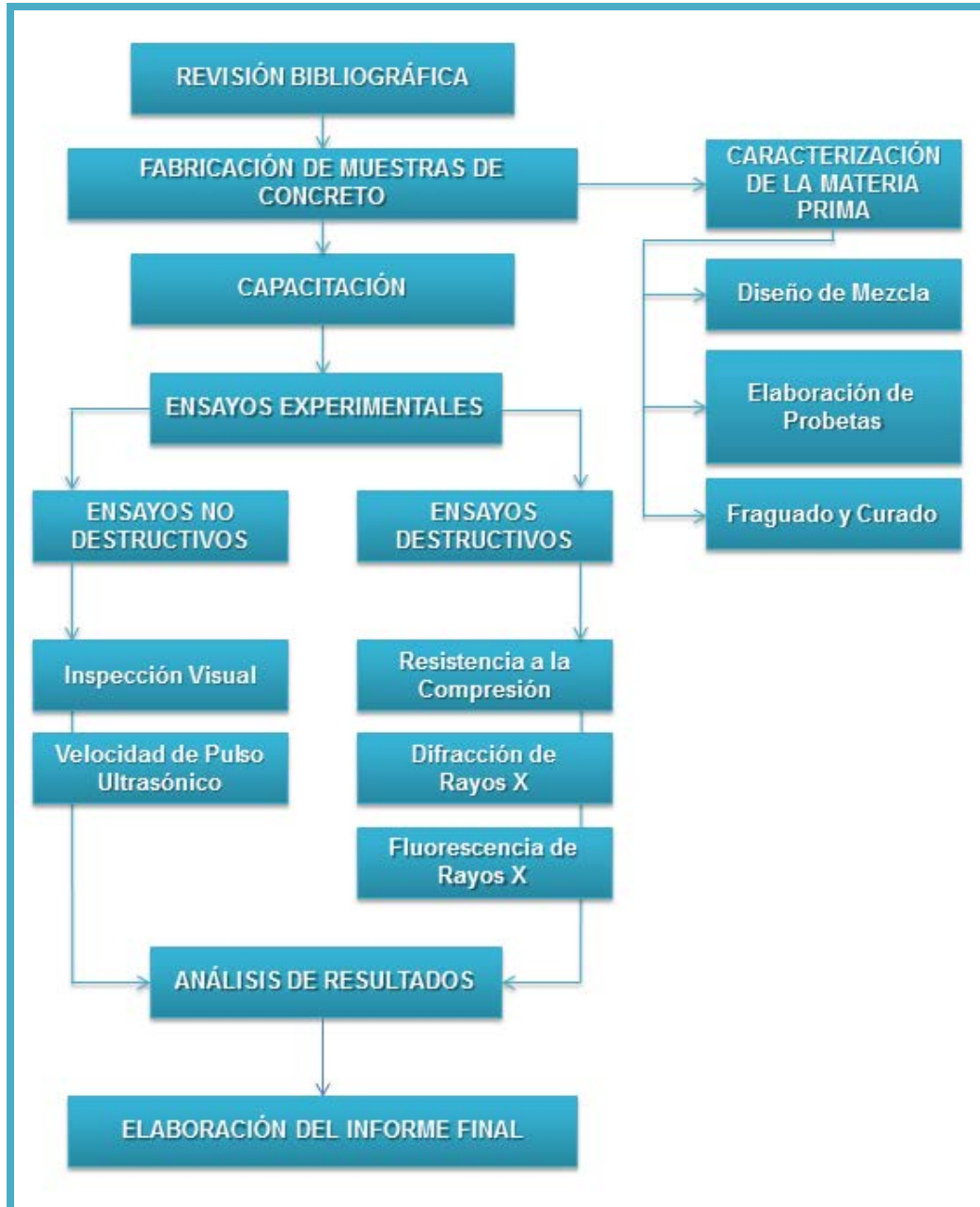
- **Edad de la pieza:** La velocidad de pulso ultrasónico es favorecida cuando la pieza de concreto en su proceso de curado aumenta su hidratación ganando rigidez y disminuyendo su porosidad interna.
- **Tipo de agregado:** El tamaño y la forma del agregado influyen directamente sobre la velocidad de pulso ultrasónico, ya que las rocas poseen velocidades de pulso mayor que la pasta de concreto.
- **La Humedad:** El equipo de ultrasonido permite captar mínimas cantidades de líquido retenido en los poros y grietas del concreto a evaluar, por ello, un aumento en la humedad de la pieza, permite un aumento proporcional de la velocidad del pulso ultrasónico.
- **Longitud de la trayectoria:** Para piezas con longitud de hasta 100 mm para un agregado de 20 mm y menor de 150 mm para un agregado de 40 mm, resulta importante tener en cuenta este factor.
- **Ataque químico:** La presencia de fases químicas en la estructura interna del concreto, por medio de métodos como la carbonatación, sulfatación,

reacción alcalí-sílice (por medio de la adición de vidrio molido en la preparación del concreto), y difusión de cloruros se puede detectar por medio de la técnica de velocidad de pulso. La presencia de cloruros en concreto sin refuerzo permite obtener lecturas de VPU mayores a la de concretos con ausencia de iones cloruro [11].

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En la Figura 6, se muestra un diagrama de flujo con las diferentes etapas que se llevaron a cabo en la presente investigación.

Figura 6. Diagrama de flujo de la metodología para el desarrollo del proyecto.



Fuente: Los autores.

3.1 REVISION BIBLIOGRÁFICA

Inicialmente se realizó una recopilación de información relacionada con el tema de la presente investigación, esta información fue extraída de trabajos de grado, libros y artículos. Con base a esto se plantearon las pruebas que se debían realizar y se consultaron normativas que se debían seguir para la realización de las mismas.

En este caso se tuvieron en cuenta normas de la ASTM e ICONTEC, las cuales fueron base importante para el desarrollo de la presente investigación.

Con base a la información y planteamientos encontrados en la literatura, se definieron parámetros importantes como el valor de la relación agua/cemento, porcentajes de NaCl para adicionar a las probetas, condiciones para su elaboración, técnicas destructivas y no destructivas y finalmente las pruebas de caracterización, para organizar el eje central de esta investigación.

3.2 FABRICACIÓN DE MUESTRAS DE CONCRETO

Para el desarrollo de la investigación, las probetas fueron elaboradas con relación de Agua/Cemento de 0.5 y se varió el contenido de NaCl en el agua utilizando 0.0%, 0.8%, 1.5% y 2.5% de NaCl con respecto al peso del cemento, realizando dilución de NaCl en el agua de fabricación de las probetas.

Se fabricaron en total 16 probetas cúbicas de 20 x 20 x 20 cm para lecturas de VPU y 16 probetas cilíndricas de 20 cm de longitud por 10 cm de diámetro para lecturas de VPU y resistencia a la compresión, dando un total de 32 probetas de concreto. Para la elaboración de estas muestras se llevaron a cabo las siguientes etapas: caracterización de la materia prima, diseño de mezcla, elaboración de las probetas, fraguado y curado

3.2.1 Caracterización de la Materia Prima

Para la fabricación de las probetas se utilizaron los siguientes materiales: Cemento Portland Tipo I, Agregados, Agua Potable y NaCl.

- **Cemento Portland Tipo I:** Este material fue suministrado por el grupo de investigación GIMAT de la UIS; su marca comercial es Argos S.A. y este producto cumple con los valores de la norma colombiana NTC 121 [19], NTC 321 [26] y la norma americana ASTM C-1157 [5].
- **Agregados:** Para la preparación de la mezcla se usó arena como agregado fino y grava como agregado grueso, los cuales fueron suministrados por la Escuela de Ingeniería Civil y cuya procedencia fue el Rio Sogamoso (Pescadero).

Para la caracterización de los agregados se realizaron pruebas granulométricas a fin de determinar el módulo de finura y el tamaño máximo de agregado grueso.

Además se determinaron gravedades específicas, pesos específicos y la absorción para cada tipo de agregado basándose en las normas NTC 92 [27], NTC 176 [28] y NTC 237 [29].

Para determinar la granulometría de los agregados se tuvo en cuenta las normas NTC 77 [30], NTC 78 [31], para su caracterización se utilizó la escala de tamices del 4, 8, 16, 30, 50 y 100 en el orden respectivo para el agregado fino, pesando la cantidad pasante en cada uno de ellos, y con ello se determinó su módulo finura; para el agregado grueso se tomó el juego de tamices $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{8}$ y 4 en el orden respectivo, hallando a su vez el tamaño máximo y tamaño máximo nominal del mismo. Adicionalmente se determinaron las gravedades específicas para cada tipo de agregado. Los resultados obtenidos se presentan en el capítulo siguiente.

3.2.2 Diseño de Mezcla

Para la elaboración del diseño de mezcla, se tuvieron en cuenta factores tales como la selección del tamaño de agregado grueso, las dimensiones de las probetas, el tipo de asentamiento y la resistencia a la compresión teórica, como se estipula en el procedimiento A.C.I.

El método de Diseño A.C.I. (American Concrete Institute), se utiliza para determinar los contenidos de la pasta de cemento (cemento, agua y aire incluido), y agregados fino y grueso (ver Tabla 3).

Tabla 3. Cantidades representativas para un diseño de mezcla de 1 m³.

Constituyente	Masa en Kg
Agua	216,000
Cemento	432,000
Agregado Fino	792,991
Agregado Grueso	879,842

Fuente: Los Autores.

Los valores numéricos de la Tabla 3, describen las cantidades significativas para el diseño de mezcla utilizado en esta investigación. Los cálculos y relaciones numéricas se describen en el ANEXO A.

3.2.3 Elaboración de probetas

Las probetas fueron elaboradas en el Centro de Caracterización de Materiales del Edificio Álvaro Beltrán Pinzón, perteneciente a la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander.

En la Figura 7, se puede observar las herramientas utilizadas para la elaboración de las probetas de concreto.

Figura 7. Instrumentación utilizada para la elaboración de las probetas.



Fuente: Los autores.

Las probetas fueron elaboradas de la siguiente manera:

- **Probetas cúbicas de 20 cm³:** Estas probetas fueron elaboradas para medición de velocidad de pulso ultrasónico. Para su elaboración se utilizaron formaletas de madera, las cuales inicialmente fueron limpiadas e internamente se les aplicó una película de grasa de calcio para evitar que la mezcla de concreto se adhiriera a la formaleta y se procedió a armarlas como se muestra en la Figura 8.

Figura 8. Formaleta para probetas de 20 cm³.



Fuente: Los autores.

- **Probetas cilíndricas:** Estas fueron elaboradas para realizar medición de resistencia a la compresión. Se utilizaron formaletas en moldes plásticos de uso industrial (ver Figura 9), los cuales inicialmente se limpiaron para retirar material adherido y se les aplicó una película de ACPM, con el fin que la mezcla se adhiriera a las paredes de la formaleta y facilitara su salida.

Figura 9. Moldes plásticos de uso industrial para el fraguado de las probetas cilíndricas.



Fuente: Los autores.

La preparación de la mezcla inició con el pesado del agregado fino y el cemento, esto se llevó a cabo en una bandeja metálica donde se mezcló y posteriormente se pesó el agregado grueso añadido de igual manera a la bandeja y mezclado con el cemento y arena anteriormente mencionados.

Para finalizar el procedimiento, se agregó el agua el cual fue medido en una probeta de 1L de volumen.

En la Figura 10, se observa la combinación de agregado fino y grueso junto al cemento. La experiencia recomienda mezclar primordialmente el cemento junto con el agregado fino en la bandeja metálica, y posteriormente añadir el agregado grueso. Esto con el fin de evitar la formación excesiva de polvo en la mezcla.

Figura 10. Mezcla de cemento, agregado grueso y arena.



Fuente: Los autores.

Para las probetas cuya agua fue contaminada con porciones de NaCl, se pesó el porcentaje de sal con respecto al contenido de cemento y se diluyó en el agua que posteriormente se agregó para cada mezcla respectivamente como se muestra en la Figura 11.

Figura 11. Mezcla entre el cemento, arena, agregado grueso y agua con adición de NaCl.



Fuente: Los autores.

Los porcentajes de NaCl utilizados en la investigación (Tabla 3) se determinaron teniendo en cuenta el diseño de mezcla calculado para 1 m³ de concreto por el método A.C.I.

Tabla 4. Kilogramos de NaCl calculados para un diseño de mezcla por el método A.C.I. para 1 m³ de concreto.

PORCENTAJE DE NaCl	PESO EN Kg
0.0%	0,0 Kg
0,8%	3,456 Kg
1,5%	6,48 Kg
2,5%	10,8 Kg

Fuente: Los autores.

Los cálculos de NaCl utilizados para cada tipo de probeta (cúbica y cilíndrica) y sus diferentes porcentajes se describe en el ANEXO A.

Una vez lista la mezcla fresca se procedió a introducirla en las formaletas en tres porciones de igual volumen aproximadamente y se apisonó con una varilla con punta semiesférica 25 veces uniformemente en cada una de las porciones de mezcla fresca vertida.

Finalmente se le dieron algunos golpes por la parte exterior del molde para garantizar una mejor compactación (ver Figura 12), y con la ayuda de un palustre se alisó la superficie para darle un acabado plano. Para este procedimiento se siguieron las recomendaciones de la norma NTC 1377 [32].

Figura 12. Apisonado de la mezcla con varilla compactadora.



Fuente: Los autores.

3.2.3 Fraguado y curado de las probetas

Posterior a su elaboración se dejaron las muestras 24 horas de fraguado dentro de los moldes (ver Figura 13), bajo techo y a temperatura ambiente. Al cumplir las 24 horas de fraguado se procedió al desencofrado o desmolde de las probetas. Se identificaron con tiza blanca y se ubicaron en orden según las concentraciones de NaCl añadidas.

Posteriormente, las probetas cubicas de 20 cm^3 y cilíndricas se dejaron en curado durante 28 días bajo techo y a condiciones ambientales.

Figura 13. Curado por 24 horas en el molde.



Fuente: Los autores.

3.3 CAPACITACIÓN

En esta parte de la investigación, se reconocieron los equipos empleados en la realización de los diferentes ensayos para el uso adecuado.

Los equipos utilizados en la realización de las pruebas se presentan a continuación:

Para determinar la velocidad de pulso ultrasónico de las probetas, se utilizó el equipo de ultrasonido de baja frecuencia marca CMS Farnell Limited Tipo PUNDIT PLUS Modelo PC1006 (ver Figura 14), con el cual se realizaron las lecturas de tiempo de vuelo y junto con las longitudes medidas permitieron conocer la velocidad de pulso ultrasónico. Este equipo se encuentra en el Laboratorio de Ensayos No Destructivos de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales de la UIS.

Figura 14. Equipo de Ultrasonico de Baja Frecuencia marca CMS Farnell Limited
Tipo PUNDIT PLUS Modelo PC1006.



Fuente: Los autores.

El equipo trabaja con 2 palpadores metálicos que hacen las veces de transductor y emisor de onda, interconectados por medio de 2 cables al equipo, con un diseño versátil para su adecuado y fácil manejo.

Los palpadores del equipo puestos en posición para lectura en modo directo se pueden apreciar en la Figura 15.

Figura 15. Palpadores del Equipo de Ultrasonido puestos en posición para modo de transmisión directa.



Fuente: Los autores.

Para la medición de longitudes, se utilizó un calibrador digital marca UPM (United Precision Machine, Inc), el cual se observa en la Figura 16. El calibrador pertenece al Grupo de Investigación en Materiales GIMAT.

Figura 16. Calibrador digital marca UPM (United Precision Machine, Inc).

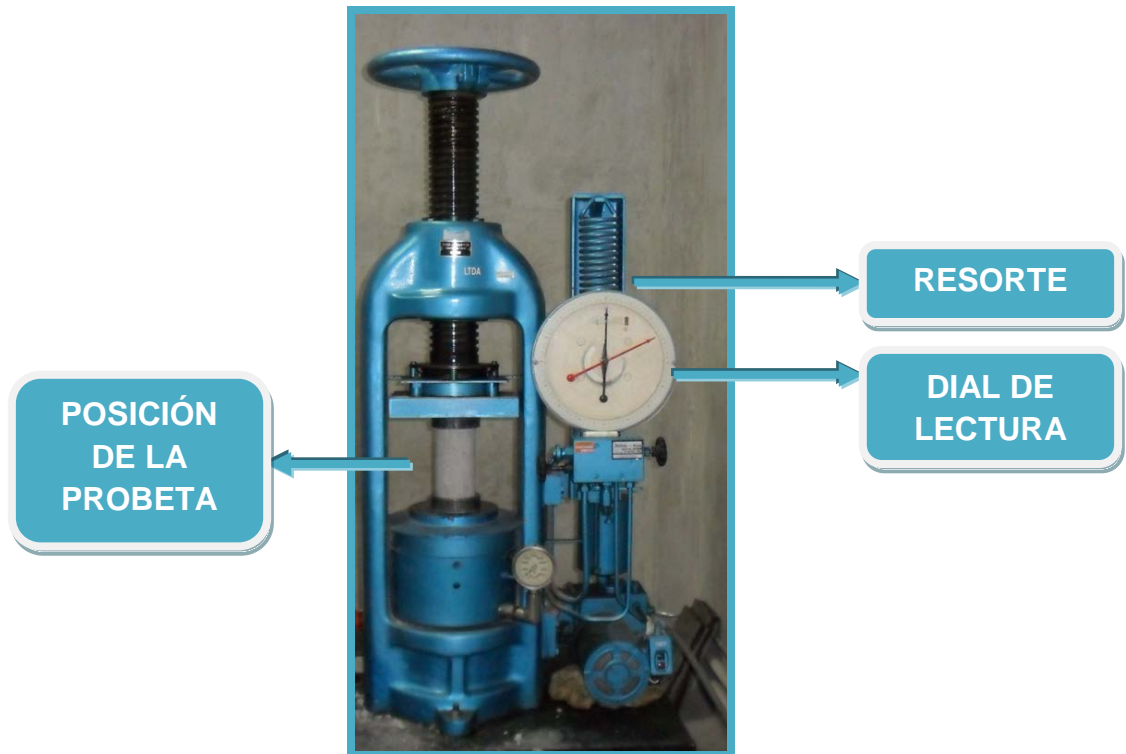


Fuente: Los autores.

En los ensayos de resistencia a la compresión de las probetas cilíndricas se utilizó la máquina universal de ensayos AMSLER (Alfred J. Amsler y Cia), la cual permite lecturas de resistencia a la compresión de hasta 80 toneladas.

La máquina universal de ensayos AMSLER (ver Figura 17), se encuentra ubicada en el Centro de Caracterización de Materiales de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander.

Figura 17. Maquina Universal de Ensayos AMSLER (Alfred J. Amsler y Cia)



Fuente: Los autores.

3.4 ENSAYOS EXPERIMENTALES

Los ensayos experimentales desarrollados en la investigación incluyen las pruebas que se planificaron para la obtención de datos y análisis para encontrar resultados satisfactorios para cumplir los objetivos planteados.

Estos ensayos se clasifican en 2 grupos: Ensayos No Destructivos y Ensayos Destructivos.

3.4.1 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

La toma de datos de los ensayos de tipo no destructivos se realizó durante el tiempo de curado de las probetas, y se registraron pruebas a los 7, 14 y 28 días para las probetas cilíndricas y los días 7 y 28 para las probetas cúbicas.

Estos ensayos fueron la inspección visual y la toma de tiempo de vuelo para calcular la velocidad de pulso ultrasónico.

3.4.1.1 Inspección Visual

Esta inspección se realizó al momento de desencofrar las probetas, verificando que la superficie de concreto se encontrara uniforme.

Las probetas cilíndricas fueron extraídas de los moldes plásticos de uso industrial por medio de aire comprimido como se puede apreciar en la Figura 18. El diseño de la formaleta para las probetas cúbicas permite el desencofrado retirando los empalmes de madera y varilla y golpeando suavemente las 2 piezas de madera.

Para las probetas con 1 día de curado en seco se preparó su superficie con un disco de piedra de esmeril, además de lijas # 80 y #120, que permitió retirar algunas heterogeneidades del material para asegurar una superficie lisa y la toma de tiempos de vuelo acertados y confiables.

Figura 18. Desencofrado de las probetas cilíndricas.

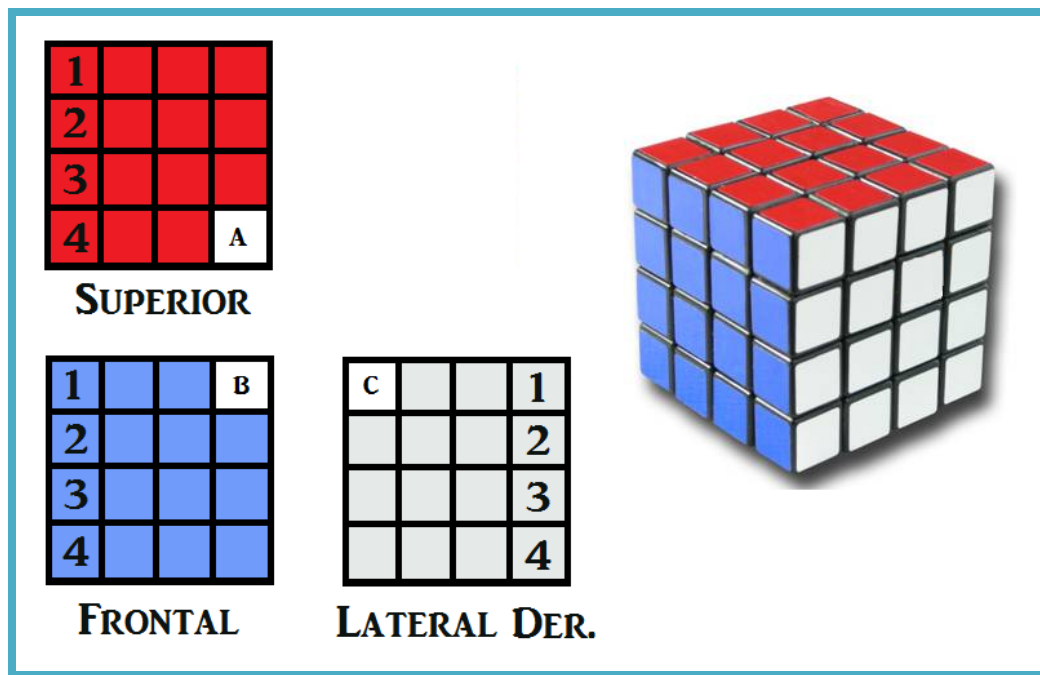


Fuente: Los autores.

3.4.1.2 Velocidad de Pulso Ultrasónico

Para la toma de lecturas de tiempo de vuelo se realizó previamente una preparación de la superficie de cada tipo de probeta y se hizo una demarcación con cuadros de 5 x 5 cm, es decir 16 recuadros en cada cara y 96 en toda la probeta como se denota en la Figura 19. Se dibujaron las líneas en las probetas con el fin de realizar las mediciones siempre en el mismo lugar.

Figura 19. Cuadrícula para la toma de tiempos de vuelo de las probetas de 20 cm³.

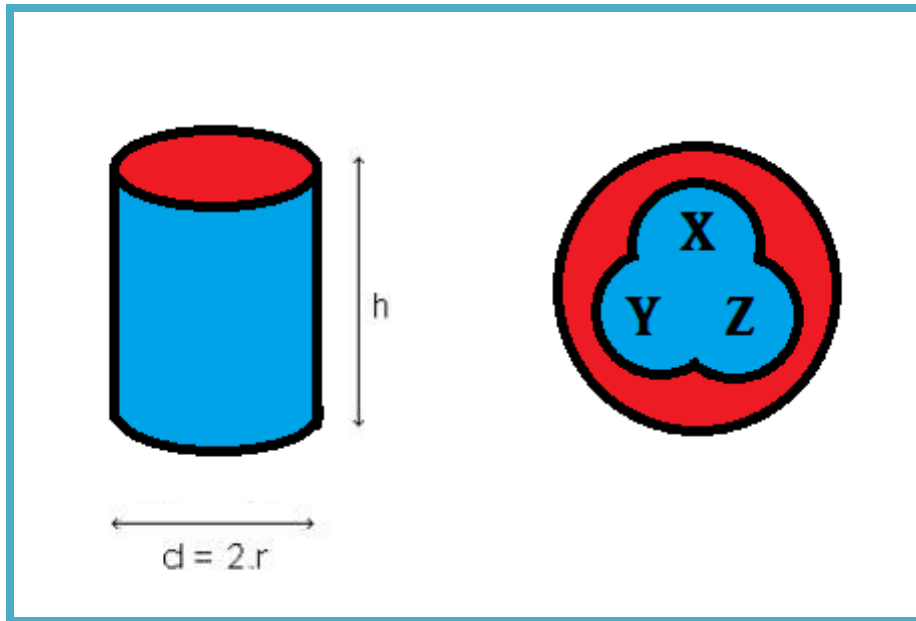


Fuente: Los autores.

En las probetas cúbicas, la cara A representa la vista superior, la cara B representa la vista frontal, y la cara C representa la cara lateral derecha. Las filas 1, 2, 3 y 4 de la cara A, al igual que la cara B y C cuentan con 4 filas demarcadas para las lecturas de tiempo de vuelo.

En el caso de las probetas cilíndricas, se establecieron 3 zonas llamadas X, Y y Z que corresponden a los tres puntos de medición en la cara de cada probeta (ver Figura 20).

Figura 20. Posiciones de lectura para probetas cilíndricas.



Fuente: Los autores.

Las tomas de tiempo de vuelo se realizaron a los 7 y 28 días de fabricación las probetas cúbicas y 7, 14 y 28 días para las probetas cilíndricas. Los resultados obtenidos se presentan en el siguiente capítulo.

Para la lectura de los tiempos de vuelo, se inicia conectando los transductores al equipo, se enciende y se procede inmediatamente a inspeccionar el nivel de carga de la batería del equipo, si el nivel está por encima de 10, se puede continuar con el procedimiento, si está por debajo de 10, se debe conectar el cargador por un tiempo de 12 horas.

Una vez cargado el equipo se lleva a cabo la calibración colocando los palpadores frente a frente. El tiempo de vuelo que debe mostrar el equipo es de $0.0 \mu s$.

Posteriormente se iniciaron las mediciones en las probetas, el manual recomienda que el operario que maniobra los palpadores sea el mismo durante todo el ensayo, esto con el fin de evitar variación en las condiciones del procedimiento, además los valores de lectura no deben diferir en más del 2% en el mismo punto de análisis.

Se utilizó vaselina como material acoplante y se identificaron las caras de las probetas de la siguiente manera:

- Cara superior – inferior A-A'
- Cara frontal – trasera B-B'
- Cara lateral derecha - izquierda C-C'

Se realizaron dos medidas en cada posición de la siguiente manera:

- Se inició la medición en el recuadro de la fila 1 y columna 1 y se avanzó por la fila hasta el cuarto recuadro, es decir fila 1 columna 4, de igual manera en las filas 2, 3 y 4.
- Una vez terminado, se realizó el mismo procedimiento dos veces para cada cara, para así obtener 96 mediciones por probeta (dos en cada recuadro), se comprobó que el porcentaje de error entre lecturas no superara el 2% para determinar su validez.

3.4.2 ENSAYOS DESTRUCTIVOS

Los ensayos destructivos de este proyecto se realizaron con el fin de establecer comparaciones, entre la resistencia a la compresión, la velocidad de pulso ultrasónico y el contenido de NaCl presente en las probetas. Los ensayos destructivos considerados son: resistencia a la compresión, difracción y

fluorescencia de rayos X. A continuación se presentan algunos detalles de los mismos:

3.4.2.1 Resistencia a la Compresión

Este ensayo destructivo se utiliza para evaluar el comportamiento del concreto a cargas de compresión, estimando su máxima carga axial soportada.

Esta prueba se realizó para 3 de las probetas cilíndricas de cada concentración, siendo 12 ensayos en total y el procedimiento seguido para esta prueba fue según la norma NTC 673 [33] utilizando la máquina universal de ensayos marca AMSLER (Alfred J. Amsler y Cia), como ya se indicó.

La probeta se situó en el centro del disco base y se giró el cabezal superior de la máquina hasta que hizo contacto con la cara superior de la probeta, luego se procedió a aplicar la carga verificando que las agujas estuvieran inicialmente en cero y posteriormente se registró el valor máximo de carga soportada.

Finalmente este dato se dividió por el área de la cara de la probeta y realizando las respectivas conversiones se obtuvo la resistencia a la compresión en unidades de MPa. Los resultados obtenidos se presentan en el siguiente capítulo.

3.4.2.2 Difracción de Rayos X

La metodología utilizada para la prueba de difracción de rayos x fue la siguiente: Las 3 muestras fueron obtenidas extrayendo pequeños trozos de concreto de la parte central (matriz) de las probetas de 0.0% 1,5% y 2,5% de cloruros (Figura 21). La probeta que posee concentración de 0,8% no se evaluó debido a que la literatura afirma que a tal concentración de cloruros, el daño en el refuerzo se considera posible [34].

Figura 21. Obtención de la matriz de las diferentes probetas.



Fuente: Los autores.

Las muestras fueron pulverizadas en un mortero de ágata (ver Figura 22), y pasados por una malla de 152 μm (malla 100) como se muestra en la Figura 23.

Figura 22. Macerado para obtención del polvo de las probetas.



Fuente: Los autores.

Figura 23. Malla 100 U.S.A. STANDARD TESTING SIEVE



Fuente: Los autores.

Las muestras fueron entregadas al Laboratorio de Difracción de Rayos X de la Universidad Industrial de Santander. El procedimiento a nivel de laboratorio para la obtención de resultados se explica en el Anexo B.

3.4.2.3 Fluorescencia de Rayos X de Energía Dispersiva (FRX)

La metodología utilizada para el procedimiento de Fluorescencia de Rayos X de Energía Dispersiva fue similar al anteriormente descrito, con la diferencia de que la muestra pulverizada se pasó por una malla # 125. Los resultados obtenidos se presentan en el siguiente capítulo.

3.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta etapa de la investigación, se presentaron y analizaron los datos obtenidos en las pruebas realizadas, buscando relacionar los resultados obtenidos experimentalmente de la inspección visual, las mediciones de velocidad de pulso ultrasónico, valores de resistencia a la compresión, difracción y fluorescencia de rayos X, para determinar el efecto del cloruro en la probeta de concreto sin refuerzo.

3.6 ELABORACIÓN DEL INFORME FINAL

Se realizó un informe detallado de la investigación con el marco teórico, la metodología utilizada, los resultados obtenidos, el análisis de resultados, las conclusiones y las recomendaciones a partir de la investigación y el trabajo experimental realizado.

4. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

En esta parte del informe se presentan los resultados obtenidos de fabricación de las muestras de concreto, los ensayos no destructivos y ensayos destructivos.

Además se hace el análisis de estos resultados y se establecen las relaciones pertinentes entre velocidad de pulso ultrasónico, resistencia a la compresión y % de cloruro existente en las probetas.

4.1 FABRICACIÓN DE MUESTRAS DE CONCRETO

Se presentan en esta parte los resultados obtenidos en la caracterización de las materias primas y diseño de mezcla.

4.1.1 Caracterización de la Materia prima

En esta etapa de la investigación (Figura 6) se presenta las características de cada uno de los materiales utilizados para la fabricación de las probetas de concreto.

- **Cemento**

La caracterización del cemento utilizado en esta investigación fue adquirida desde el sitio web de la empresa ARGOS S.A. para conocer su composición y se especifica en la Tabla 5.

La ficha técnica no evidencia la presencia de algún compuesto químico que contenga Cloro, por lo cual, este tipo de cemento resulta apto para la el desarrollo de esta investigación.

Tabla 5. Especificaciones técnicas del cemento ARGOS Portland Tipo I

Especificaciones Técnicas			
PARÁMETROS QUÍMICOS	ESPECIFICACIONES ARGOS	NTC 321 Tipo I	ASTM C-1157 Tipo GU
Óxido de magnesio, MgO, máximo (%)	6.00	7.00	-
Trióxido de azufre, SO ₃ , máximo (%)	3.50	3.50	-
PARÁMETROS FÍSICOS	ESPECIFICACIONES ARGOS	NTC 121 Tipo I	ASTM C-1157 Tipo GU
Fraguado inicial ⁽¹⁾ , mínimo (minutos)	90	45	45
Fraguado final ⁽¹⁾ , máximo (minutos)	320	480	420
Expansión autoclave, máximo (%)	0.80	0.80	0.80
Expansión en agua ⁽²⁾ , máximo (%)	0.02	-	0.02
Resistencia a 3 días ⁽³⁾ , mínimo (Mpa)	13	8.0	10.0
Resistencia a 7 días ⁽³⁾ , mínimo (Mpa)	20	15.0	17.0
Resistencia a 28 días ⁽³⁾ , mínimo (Mpa)	28	24.0	28.0

Fuente: ARGOS S.A. sitio web: <http://www.argos.co/site/Default.aspx?tabid=88> [35].

- **Agregados Fino y Grueso**

La caracterización de los agregados fino y grueso utilizados para la investigación son los indicados en la Tabla 6.

Tabla 6. Caracterización de los agregados fino y grueso.

Característica	Agregado Fino	Agregado Grueso
Peso unitario suelto [Kg/m ³]	1391,02	1381,37
Peso unitario compactado [Kg/m ³]	1650	1496,37
% Absorción	1,87	2,082
% Vacíos	37,26	42,097
Gravedad específica real	2,71	2,672
Gravedad específica aparente	2,58	2,531
Gravedad específica aparente SSS	2,63	2,584

Fuente: Los autores.

La distribución granulométrica de los agregados finos también se describe en la Tabla 7.

Tabla 7. Distribución granulométrica del agregado fino.

Tamiz	Peso Retenido [g]	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasante
4	26,3	2,63	2,63	97,37
8	53,0	5,3	7,93	92,07
16	109,3	10,93	18,87	81,13
30	220,5	22,06	40,93	59,07
50	33,8	3,38	44,31	55,69
100	482,7	48,29	92,61	7,39
Fondo	73,9	7,39	100,0	0,0
Peso Muestra				1000 [g]

Fuente: Los autores.

Para el cálculo del módulo de finura utilizamos la ecuación (2):


$$\text{Módulo de Finura} = \frac{\sum \% \text{Retenido Acumulado (antes de la bandeja)}}{100} \quad (2)$$

Módulo de finura: 2.073

- **Agua**

El agua utilizada para el desarrollo de la investigación fue suministrada por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, cuya calidad fisicoquímica y microbiológica queda expresada en la Tabla 8.

Tabla 8. Calidad fisicoquímica y microbiológica promedio mensual del agua tratada para consumo humano del A.M.B.

No Aplica F CC 507-006 Rev.:0		CALIDAD FISICOQUIMICA Y MICROBIOLOGICA PROMEDIO MENSUAL DEL AGUA TRATADA RED DE DISTRIBUCION														 <small>ASOCIACIÓN MUNICIPAL DE BUENOS AIRES</small> <small>DE BUENOS AIRES S.A. S.C.A.</small>				
LABORATORIO DE CONTROL CALIDAD AGUAS																				
MUNICIPIO:		BUCARAMANGA		AÑO:		2011														
PARAMETROS MES	No. Muestras Físicoquímicas	Parámetros Fisicoquímicos											Parámetros Microbiológicos					Σ IRCA MENSUAL		
		Cloro residual mg Cl ₂ /L	Turbiedad UNT	Color aparente Unidades Pt-Co	pH Unidades	Olor y Sabor 0. Aceptable 1. No Aceptable	Aluminio mg A/L	Alcalinidad mg CaCO ₃ /L	Dureza mg CaCO ₃ /L	Cloruro mg Cl/L	Sulfatos mg SO ₄ /L	Hierro mg Fe/L	Nitrato mg NO ₃ /L	Nitrito mg NO ₂ /L	No. de Muestras Microbiológicas	Muestras Positivas Coliformes Totales	% Aceptabilidad Coliformes Totales		Muestras positivas E. Coli	% Aceptabilidad E. Coli
Enero	9	0,95	0,80	4,1	7,19	0	0,05	46,1	65,5	3,4	26,7	N.D	1,4	N.D	180	0	100	0	100	0,00
Febrero	8	0,95	0,70	3,5	7,27	0	0,05	51,7	69,5	3,8	26,8	N.D	1,2	N.D	168	0	100	0	100	0,00
Marzo	9	0,94	1,00	5,9	7,15	0	0,06	44,9	69,1	4,0	27,6	N.D	1,1	N.D	186	0	100	0	100	0,00
Abril	8	0,93	0,87	5,0	7,14	0	0,04	44,6	69,1	2,4	34,4	N.D	1,2	N.D	174	0	100	0	100	0,00
Mayo	9	1,02	0,69	3,8	7,12	0	0,04	39,5	62,9	2,5	29,8	N.D	1,3	N.D	186	0	100	0	100	0,00
Junio	9	1,10	0,86	5,0	7,09	0	0,04	41,1	65,0	2,8	27,8	N.D	1,2	N.D	180	0	100	0	100	0,00
PROMEDIO	9	0,98	0,82	4,6	7,16	0	0,05	44,7	66,9	3,1	28,9	N.D	1,2	N.D	179	0,0	100	0,0	100	0,00
RES. 2115/07	3/d	0,3-2,0	≤2	≤15	6,5-9,0	ACEP	0,2	200	300	250	250	0,3	10	0,1	6/dia	0	100	0	100	0 - 5
Convenções:		mg/L miligramos por litro		UNT: Unidades Nefelométricas de Turbiedad		Unidades Pt-Co: Unidades de Platino Cobalto		IRCA: Índice de Riesgo de Calidad del Agua		N.D: No Detectable										
Nota:		El IRCA promedio, determinado en este periodo con los parámetros ensayados y establecidos en la Resolución 2115 de 2007, clasifica el agua "sin riesgo" y "apta para el consumo humano"																		

Elaboró: Leonor Chacón Zárate Revisó y Aprobó: CARLOS MANUEL PARRA GOMEZ
Jefe de Control Calidad Aguas

Fuente: Ficha técnica del agua del Acueducto Municipal de Bucaramanga.

La ficha técnica evidencia la presencia promedio de pequeñísimas cantidades de cloro residual en el agua del orden de hasta 1 miligramo por litro. Para efectos de esta investigación se interpreta como una cantidad despreciable por lo cual se asume que este tipo de agua tratada de consumo humano es apropiada para la elaboración del concreto.

- **NaCl (Sal)**

La sal utilizada para los porcentajes de cloruro que se adicionaron en las diferentes probetas fue seleccionada entre diferentes marcas de sal de consumo comercial. Por tener el grado de pureza más alto del mercado se escogió REFISAL ALTA PUREZA, cuya ficha técnica se describe en la Tabla 9:

Tabla 9. Características fisicoquímicas de la sal REFISAL ALTA PUREZA

NOMBRE DEL PRODUCTO	SAL ALTA PUREZA REFISAL				
PAÍS	COLOMBIA				
DESCRIPCIÓN FÍSICA	La sal purificada, refinada, yodada y fluorizada para consumo humano (Cloruro de Sodio) cristalino, es un sólido blanco, incoloro, higroscópico y altamente soluble en agua.				
INGREDIENTES PRINCIPALES	Es un producto de origen mina, obtenido a partir de la cristalización por evaporación mecánica o Vacuum.				
CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS	PARAMETROS	UNIDADES	ESPECIFICACIÓN	VALORES TÍPICOS	
	Cloruro de Sodio	% en peso base seca	99 mín.	99,76	
	Yodo	mg/kg de I	50-100	60-84	
	Flúor	mg/kg de F-	180-220	180 - 220	
	Magnesio	mg/kg de Mg ⁺⁺	800 máx.	2	
	Calcio	mg/kg de Ca ⁺⁺	1000 máx.	15	
	Humedad	% peso	0,2 máx.	0,05	
	Otros insolubles en agua	mg/kg	1600 máx.	300	
	Anticompactante (E-535)	mg/kg	10 máx.	10	
	Granulometría M-18	% que pasa	N/A	N/A	
	Granulometría M-20	% que pasa	80 mín.	100	
	Granulometría M-25	% que pasa	N/A	N/A	
	Granulometría M-30	% que pasa	N/A	N/A	
	Granulometría M-60	% que pasa	N/A	N/A	
	Granulometría M-70	% que pasa	20 máx.	20	
	Granulometría M-80	% que pasa	N/A	N/A	
	Los siguientes datos son analizados semestralmente por un laboratorio externo a Brinsa S.A.				
	Arsénico	mg/kg	1 máx.	0,001	
Cobre	mg/kg	N/A	N/A		
Plomo	mg/kg	1 máx.	0,01		
Cadmio	mg/kg	N/A	N/A		
Mercurio	mg/kg	N/A	N/A		
Los parámetros de contenido de Yodo y Flúor en la sal purificada, refinada, yodada y fluorizada para consumo humano deben cumplir con la norma obligatoria vigente para el país de destino del producto. En los casos donde el cliente requiera una especificación diferente, se debe tener permiso de la autoridad competente y pactar dicho(s) requisito(s) a través de modificación del contrato.					
Cumple con el Decreto 0547 de marzo 19 de 1996 del Ministerio de Salud Colombiano.					

Fuente: Ficha técnica de REFISAL ALTA PUREZA [36].

La Tabla 9 evidencia el porcentaje en peso con base seca del NaCl que alcanza un nivel de 99,76% de pureza. De acuerdo a estos resultados es válido afirmar que la sal REFISAL ALTA PUREZA es apta para el desarrollo de la presente investigación puesto que cumple con los parámetros y características requeridos.

4.1.2 Diseño de Mezcla

A partir de los resultados obtenidos en la caracterización de la materia prima se determinó la cantidad de material a mezclar para fabricar 1 m³ de concreto, dichos

valores se dividieron en 125 partes logrando establecer los pesos de cada material para elaborar una probeta cúbica. Los resultados se muestran en la tabla 10:

Tabla 10. Diseño de mezcla para una probeta cúbica.

CONSTITUYENTE	MASA (Kg)
AGUA	1,728 Kg
CEMENTO	3,456 Kg
AGREGADO GRUESO	6,344 Kg
AGREGADO FINO	7,04 Kg

Fuente: Los autores

Para las probetas cilíndricas se establecieron las cantidades de material en kilogramos indicadas en la Tabla 11:

Tabla 11. Diseño de mezcla para una probeta cilíndrica.

CONSTITUYENTE	MASA (Kg)
AGUA	0,3558 Kg
CEMENTO	0,7117 Kg
AGREGADO GRUESO	1,3064 Kg
AGREGADO FINO	1,4495 Kg

Fuente: Los Autores.

4.2 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Fase de la investigación donde se exponen los resultados obtenidos a partir de las pruebas de inspección visual y velocidad de pulso ultrasónico.

4.2.1 Inspección Visual

La inspección visual se realizó luego de la extracción de las formaletas y moldes tanto de las probetas cúbicas como cilíndricas. Durante los días seleccionados para la toma de datos de las probetas cilíndricas 7, 14 y 28, así como para las probetas cúbicas 7 y 28 se realizaron la medición de valores dimensionales con el calibrador digital.

Las probetas en general no presentaron cambios dimensionales en cuanto a longitud y diámetro, porosidades mayores, ni agrietamientos como se aprecia en la Figura 24:

Figura 24. Probetas cúbicas y cilíndricas sin cambios dimensionales.



Fuente: Los Autores.

4.2.2 Velocidad de Pulso Ultrasónico

Esta prueba se desarrolló preparando 32 probetas mediante un proceso de pulido superficial por medio de disco de piedra de esmeril y lijado manual como se indicó en la metodología. Se realizaron las lecturas de los tiempos de vuelo para cada probeta según lo indicado en la metodología. En el ANEXO D se presentan los resultados obtenidos para algunas de las probetas.

Posterior a la toma de lecturas de tiempos de vuelo se procedió a realizar la medición de las dimensiones de las probetas para obtener las longitudes de cada una de ellas (altura, ancho y profundidad para probetas cúbicas, altura y diámetro para probetas cilíndricas), con el fin de utilizar la ecuación (1) para obtener la velocidad de pulso ultrasónico de cada punto de medición.

A continuación en las Tablas 12 y 13, se muestran el promedio y las desviaciones estándar de las velocidades de pulso ultrasónico para probetas de 20 cm³ a los 7 y 28 días para las diferentes concentraciones y para las probetas cilíndricas los días 7, 14 y 28 días, respectivamente.

Tabla 12. Promedios de velocidad y desviación estándar de mediciones de velocidad de pulso ultrasónico en probetas cubicas de 20cm³.

0%			1,50%		
	VPU m/s		VPU m/s		
7 Días	Media	Desv Stnd	7 Días	Media	Desv Stnd
1	3360,877	86,12142	1	3690,788	105,4121
2	3350,794	72,46217	2	3563,214	55,59831
3	3370,652	98,61403	3	3554,157	109,2921
4	3363,316	119,6749	4	3574,422	87,19142
Media	3361,41	8,205967	Media	3595,645	63,96789
28 Días			28 Días		
1	3700,493	83,36315	1	3741,979	85,62294
2	3762,698	124,7975	2	3700,336	59,66378
3	3772,68	125,8063	3	3670,672	91,2918
4	3667,227	131,4576	4	3670,85	65,9062
Media	3725,775	50,43279	Media	3695,959	33,69914
0,80%			2,50%		
7 Días			7 Días		
1	3638,096	115,1816	1	3602,247	120,2108
2	3633,579	277,4109	2	3527,002	98,8478
3	3627,318	95,18468	3	3600,252	113,2271
4	3638,398	99,53155	4	3663,618	84,00759
Media	3634,348	5,17904	Media	3598,28	55,88464
28 Días			28 Días		
1	3756,702	88,76939	1	3733,249	98,32649
2	3757,585	291,9733	2	3687,947	77,15467
3	3734,418	90,78132	3	3730,912	110,4736
4	3690,788	105,4121	4	3698,337	87,10201
Media	3734,873	31,28371	Media	3712,611	22,89785

Fuente: los autores.

Tabla 13. Promedios de velocidad y desviación estándar de mediciones de velocidad de pulso ultrasónico en probetas cilíndricas con diámetro 10 cm y longitud 20 cm.

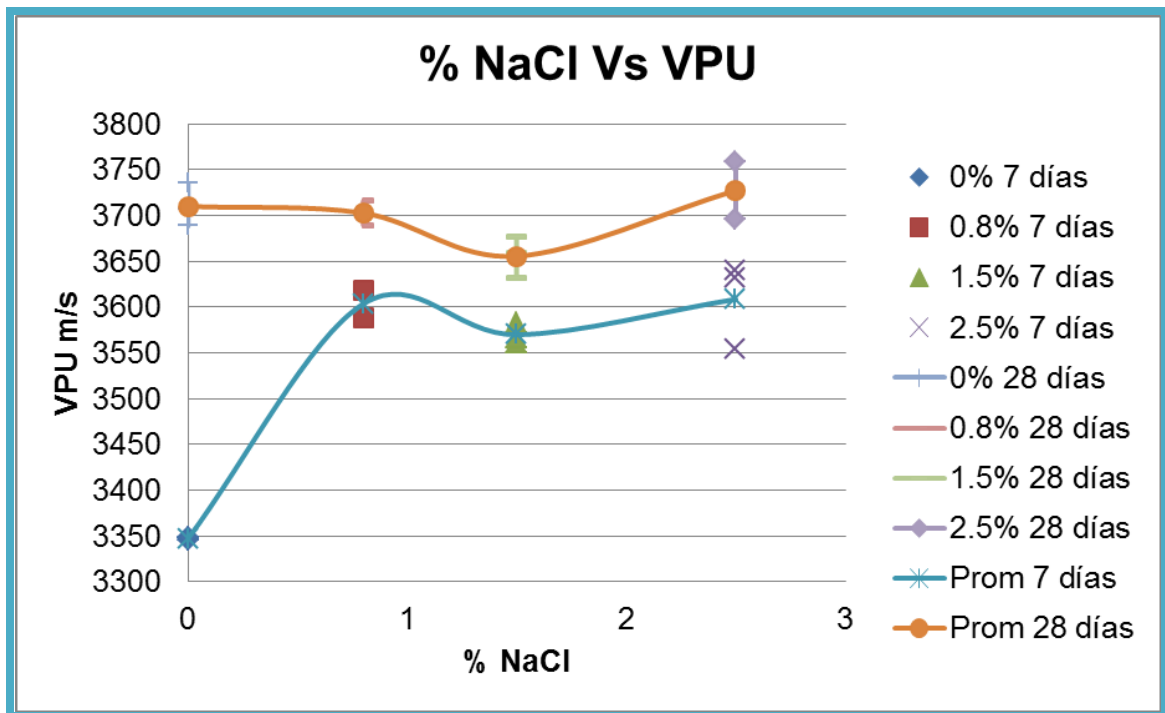
7 Días			14 Días			28 Días		
0%	Media	Desv Estand	0%	Media	Desv Estand	0%	Media	Desv Estand
1	3153,2179	44,49815153	1	3321,815	5,56949E-13	1	3361,968	2,70908034
2	3205,3685	11,68698323	2	3297,251	49,69635347	2	3358,318	43,8896531
3	3169,0288	4,364452123	3	3277,199	21,4825916	3	3332,458	23,0210139
4	3244,227	22,78400847	4	3292,292	32,21051122	4	3420,334	13,8517424
Prom 0%	3192,9606	40,55614989	Prom 0%	3297,139	18,52940823	Prom 0%	3368,269	37,1118084
0.8%			0.8%			0.8%		
1	3430,8589	66,83844989	1	3519,488	17,76046754	1	3554,306	3,48795366
2	3527,2118	49,56528201	2	3544,762	18,34132495	2	3626,784	17,3268939
3	3552,7292	21,19516606	3	3566,13	44,42634614	3	3598,599	28,1800365
4	3624,5492	37,35444089	4	3608,876	35,87829502	4	3599,663	43,6442128
Prom 0.8%	3533,8373	80,07082834	Prom 0.8%	3559,814	37,85809102	Prom 0.8%	3594,838	30,0044827
1.5%			1.5%			1.5%		
1	3665,0063	33,11934314	1	3674,687	30,84955678	1	3745,157	24,4689541
2	3663,0381	40,38716393	2	3669,238	16,1499695	2	3785,072	46,7724409
3	3671,1386	31,11111096	3	3611,69	35,13461686	3	3715,871	22,1503898
4	3647,7024	36,471776	4	3593,186	83,02449619	4	3643,408	33,0386888
Prom 1.5%	3661,7214	9,962258348	Prom 1.5%	3637,2	40,90507631	Prom 1.5%	3722,377	59,7998608
2.5%			2.5%			2.5%		
1	3692,7972	17,25322418	1	3694,932	6,816177463	1	3663,604	14,7215174
2	3710,7938	34,9656973	2	3668,528	33,7686909	2	3737,105	15,7285813
3	3635,878	26,60532326	3	3617,835	16,34680136	3	3691,856	15,0710309
4	3710,8231	21,30078232	4	3672,658	18,03953929	4	3708,661	25,8719817
Prom 2.5%	3687,573	35,49384333	Prom 2.5%	3663,488	32,56994269	Prom 2.5%	3700,307	30,7811869

Fuente: los autores.

Para el análisis de los datos en probetas cúbicas se tomaron los promedios de noventa y seis mediciones de VPU para cada una de las probetas, en las cilíndricas se tomaron seis mediciones por cada probeta.

La Gráfica 1, permite observar el comportamiento de la velocidad de pulso ultrasónico en relación al contenido de NaCl presente en las probetas cúbicas.

Gráfica 1. VPU respecto al porcentaje de NaCl a los 7 y 28 días de curado, para probetas cúbicas.



Fuente: Los autores.

La gráfica 1, expone el comportamiento de las VPU versus el contenido de NaCl en las probetas cúbicas de 20 cm³. Además se observa una tendencia entre las mediciones de velocidad de pulso ultrasónico a los 7 días y a los 28 días distintas entre sí. Se observa que las curvas presentan un comportamiento similar de 0,8% a 2,5% de NaCl.

La variación en la tendencia para la curva de promedios de VPU a los 28 días para las probetas sin adición de NaCl se atribuye a una posible falla por parte del cable del transductor, ya que durante las mediciones de VPU presento anomalías y tuvo que ser reemplazado.

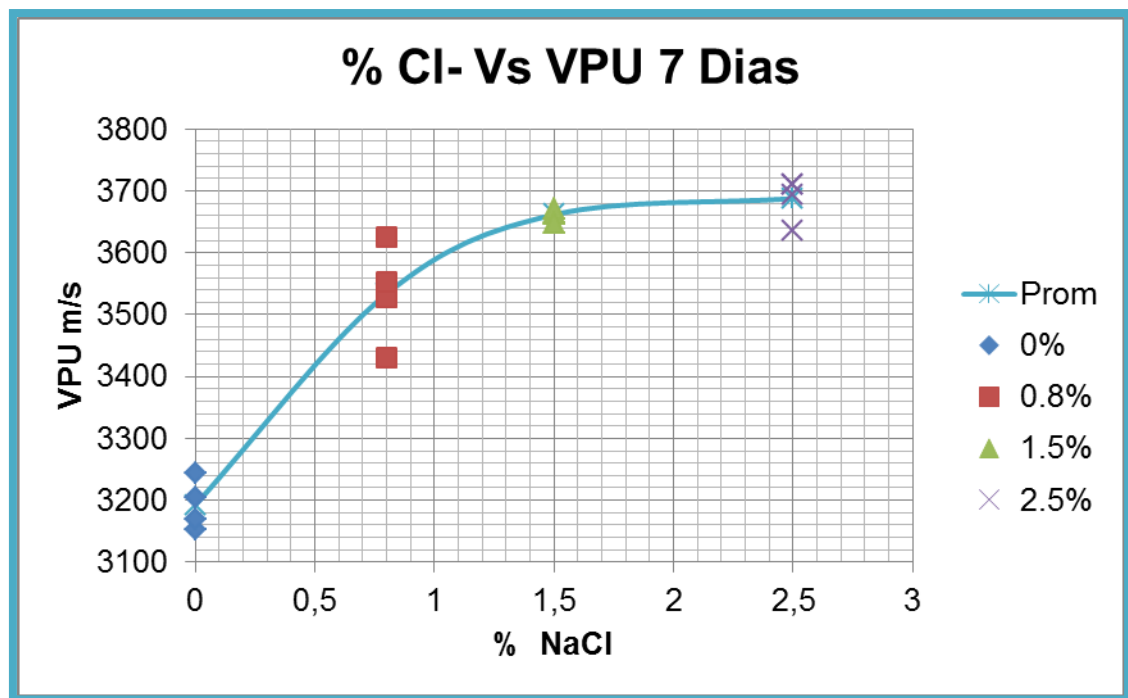
Cabe resaltar el aumento en la velocidad de pulso ultrasónico para las probetas a los 28 días de curado en seco para las probetas cúbicas debido a que el concreto ha obtenido mayor compactación interna, además de una mayor resistencia.

Los tiempos de vuelo de las probetas cúbicas comparados entre el día 7 y el día 28 disminuyeron aproximadamente 5 μ s.

Esta disminución se puede considerar debido a que a los 28 días el concreto se encuentra mucho más compacto en su interior, por lo cual al utilizar el equipo de ultrasonido, se encuentra que la onda que viaja desde un transductor a otro realiza el mismo recorrido pero en un tiempo menor, es decir la velocidad de pulso ultrasónico aumento para las probetas a los 28 días de curado.

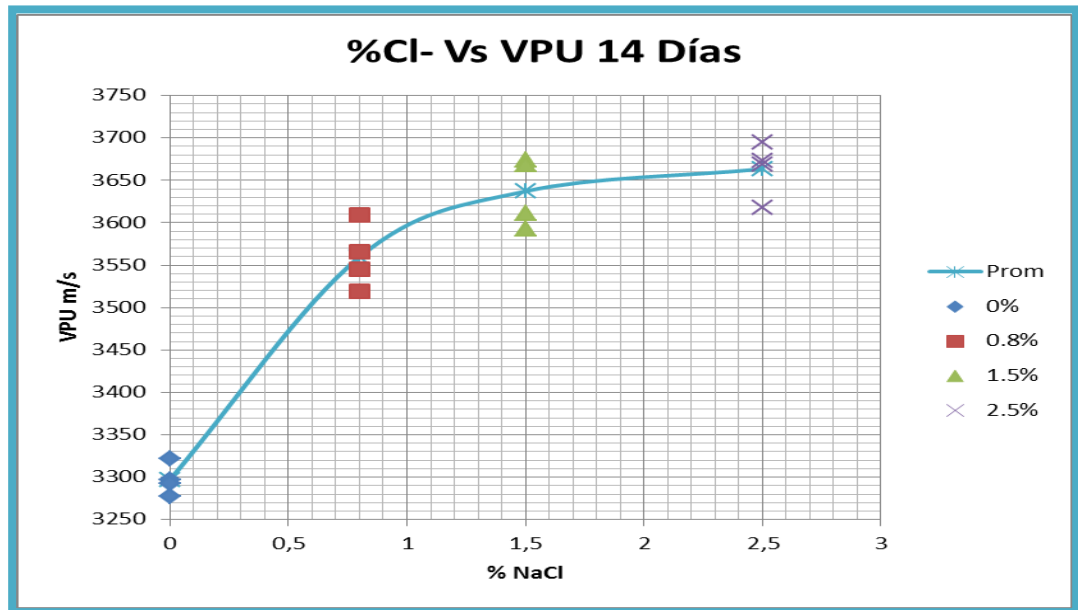
En cuanto a las probetas cilíndricas, los resultados obtenidos se muestran a continuación en las gráficas 2, 3 y 4, la línea azul nos enseña el comportamiento promedio de la VPU calculada para las probetas en estudio.

Gráfica 2. VPU respecto al porcentaje de NaCl a los 7 días de curado, para probetas cilíndricas.



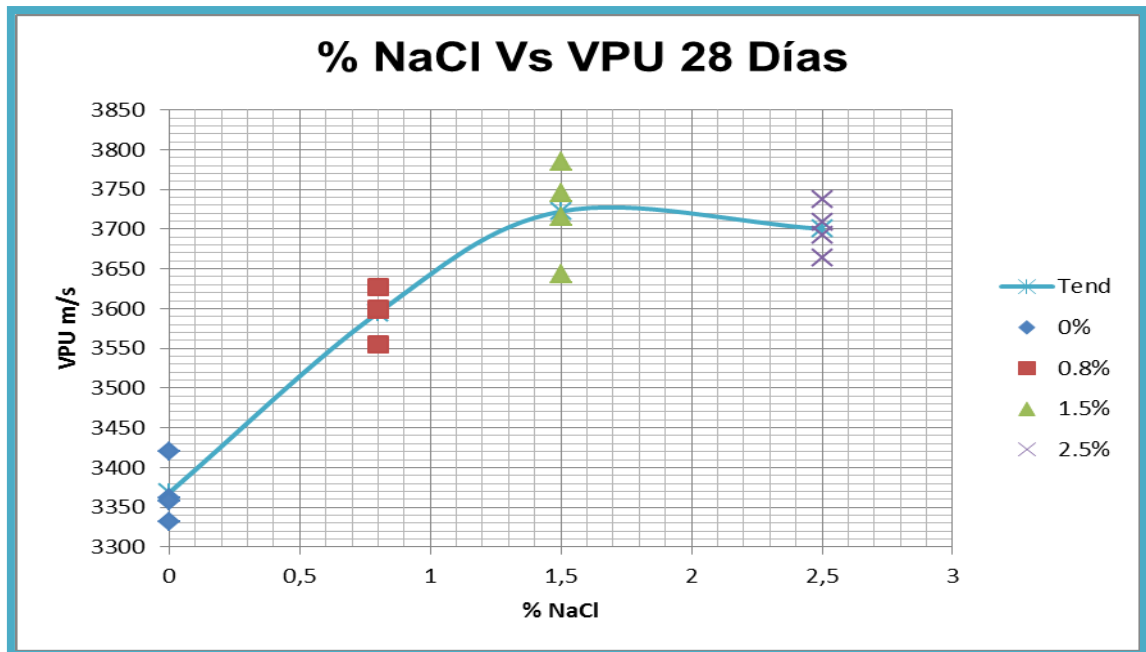
Fuente: Los autores.

Gráfica 3. VPU respecto al porcentaje de NaCl a los 14 días de curado, para probetas cilíndricas.



Fuente: Los autores.

Gráfica 4. VPU respecto al porcentaje de NaCl a los 28 días de curado, para probetas cilíndricas.

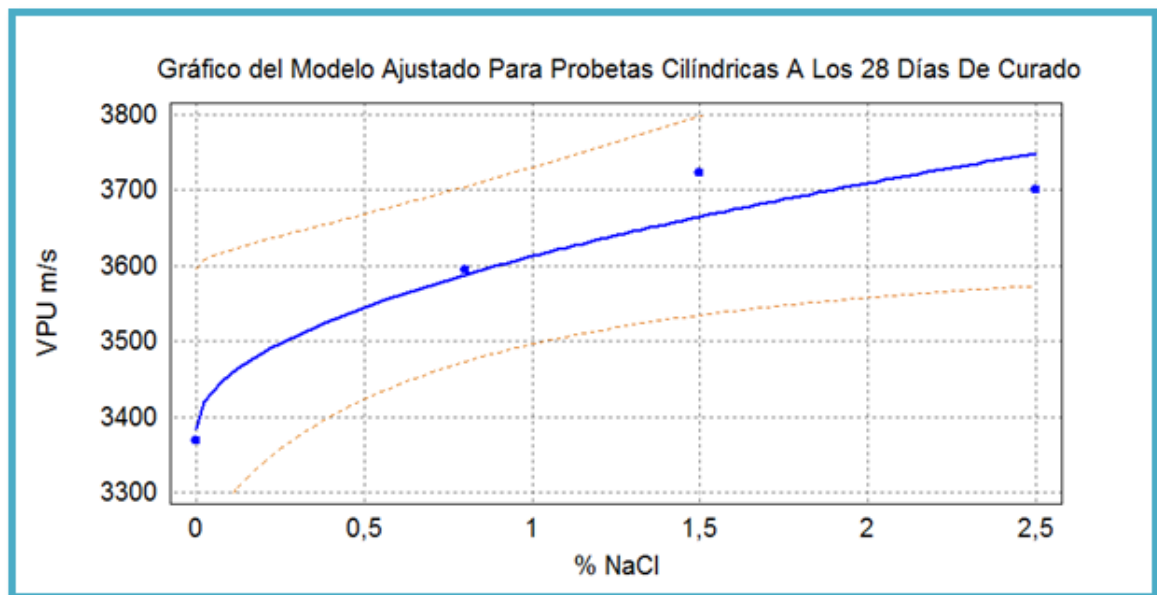


Fuente: Los autores.

Se puede observar el comportamiento de la VPU al amentar el contenido de NaCl en el agua de fabricación de las probetas a los 7, 14 y 28 días de curado. Se encuentra un aumento significativo en la VPU para las probetas con 0,8% de NaCl con respecto a las probetas con 0,0% de NaCl, posteriormente sigue aumentando en menor proporción, hasta el punto de 1.5% de NaCl, a partir del cual la curva tiende a estabilizarse.

Se realizó un análisis comparando valores de correlación para diferentes tipos de regresión, donde finalmente se escogió la regresión simple de la forma (raíz cuadrada), en el programa STATGRAPHICS, para ajustar los resultados obtenidos en las probetas cilíndricas a los 28 días de curado (ver Gráfica 5).

Gráfica 5. Ajuste de modelo doble raíz cuadrada para describir la relación entre la VPU y el % NaCl en probetas cilíndricas a los 28 días de curado.



Fuente: Los autores.

En la gráfica 5, la línea azul indica el ajuste del modelo raíz cuadrada, las líneas a trazos de color naranja nos indica los límites de confiabilidad del modelo.

Tabla 14. Resultados de ajustar un modelo de doble raíz cuadrada para describir la relación entre la VPU y el % NaCl en probetas cilíndricas a los 28 días de curado.

PARÁMETRO	ESTIMADO	VALOR-P	R CUADRADO	CORRELACIÓN
Intercepto	3383,47	0,0002	92,7217	0,962921
Pendiente	230,228	0,0371		

Fuente: Los autores.

La tabla 14 corresponde al análisis estadístico para el modelo ajustado, puesto que el valor-P en la tabla es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre la VPU y el % NaCl, con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajustado explica 92,7271% de la variabilidad en la VPU después de transformar a una escala logarítmica para linealizar el modelo. El coeficiente de correlación es igual a 0,962921, indicando una relación relativamente fuerte entre las variables.

La ecuación del modelo ajustado es:

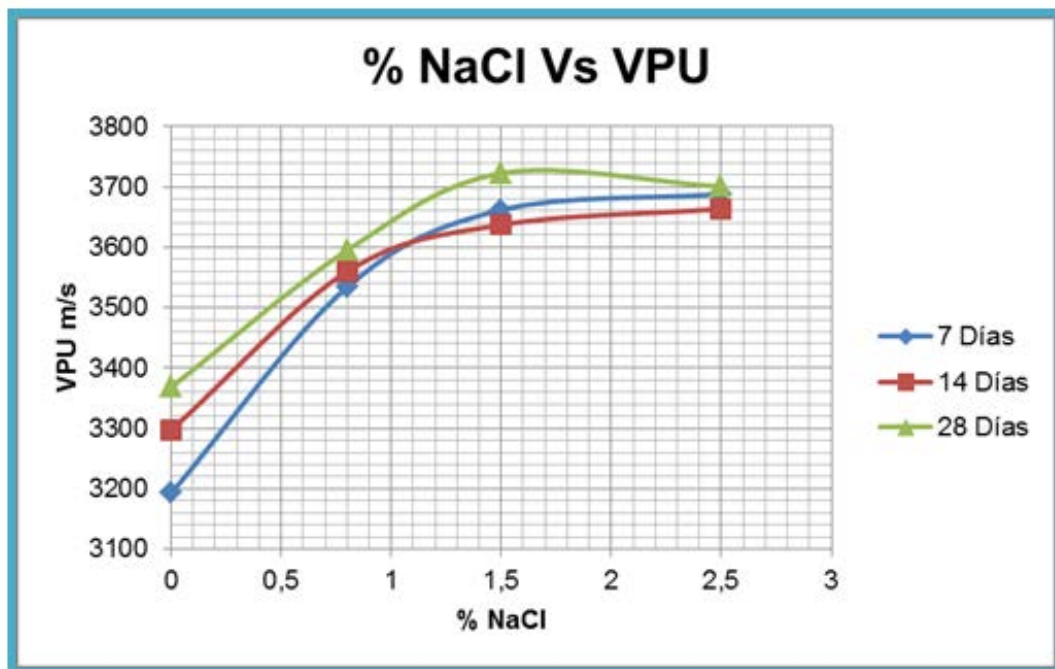
$$VPU = (3383,47 + 230,228 * \sqrt{\% NaCl})$$

En la Grafica 6, podemos observar el comportamiento de la VPU en las probetas cilíndricas a los 7, 14 y 28 días de curado. Como se puede apreciar, el comportamiento mantiene una tendencia al aumento hasta el porcentaje de NaCl de 1,5%, donde comienza a adquirir comportamiento lineal.

Además se aprecia que al día 28, las probetas aumentaron sus valores promediados de VPU y se encuentran notoriamente por encima de los días 7 y 14.

Este comportamiento es propio de la naturaleza del curado del concreto, puesto que la literatura afirma que este último adquiere su máxima resistencia alrededor de los 28 días de curado.

Gráfica 6. VPU respecto al porcentaje de NaCl para los 7, 14 y 28 días de curado de probetas cilíndricas.



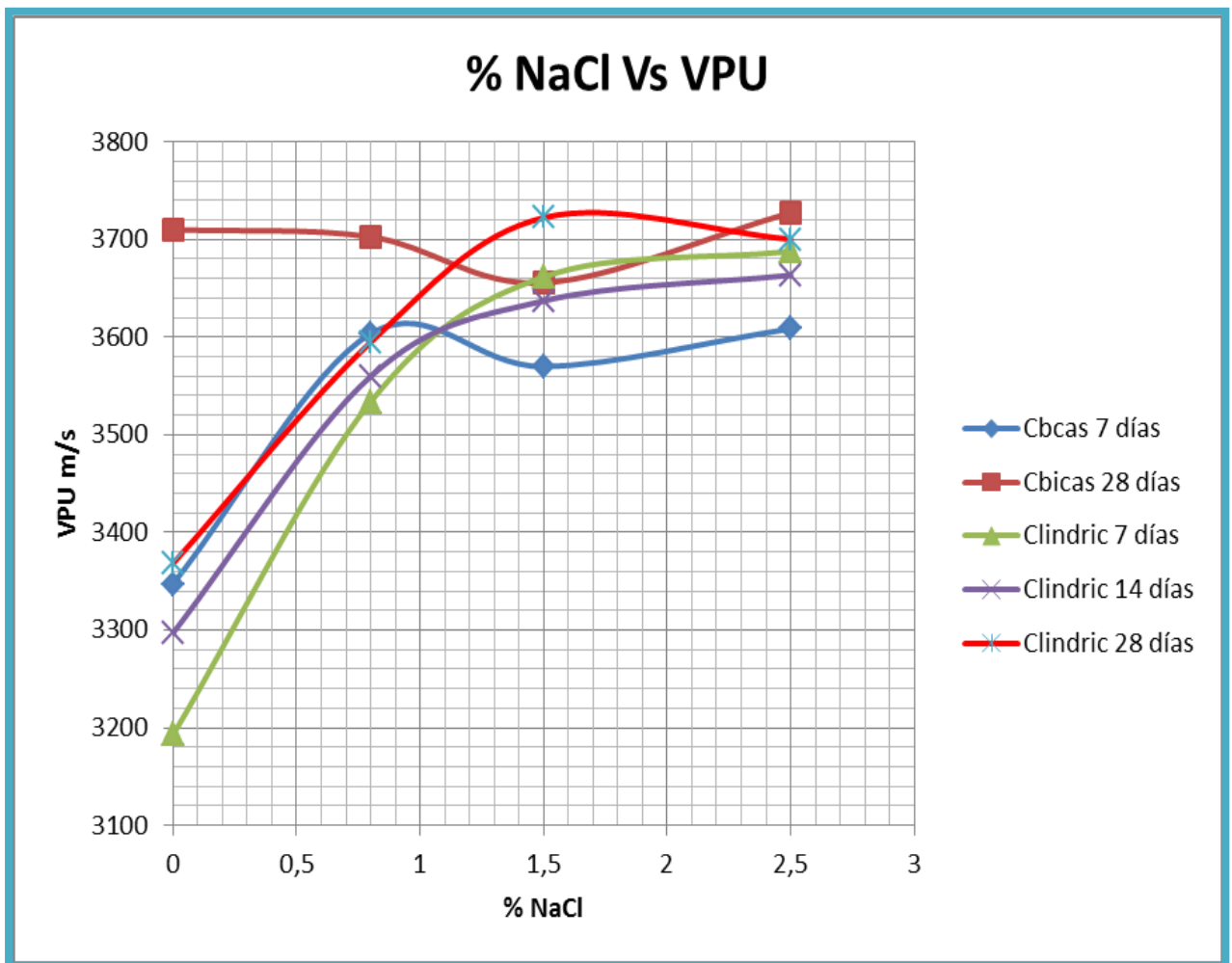
Fuente: Los autores.

En la Gráfica 7, se observa que el comportamiento general de las diferentes curvas pertenecientes a las probetas cúbicas y cilíndricas mantiene la tendencia de la gráfica 5, donde se ajustaron los datos al modelo doble raíz cuadrada, realizando una excepción para la curva de 28 días de curado para probetas cúbicas donde los datos no se ajustaron al modelo de regresión, y presenta un cambio en el rango de 0 % a 0,8 % de NaCl.

El aumento de la VPU se refleja en mayor parte para las concentraciones de 1,5 % de NaCl en todos los casos de las probetas cúbicas y cilíndricas, lo que permite

corroborar que la VPU aumenta de manera notoria por el efecto de NaCl adicionado en el agua de fabricación de las probetas.

Gráfica 7. Comportamiento de % NaCl Vs VPU en probetas cubicas a los 7 y 28 días y cilíndricas a los 7, 14 y 28 días de curado.



Fuente: Los autores.

4.3 ENSAYOS DESTRUCTIVOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de resistencia a la compresión, difracción de rayos X y fluorescencia de rayos X realizados.

4.3.1 Resistencia a la Compresión

Para la resistencia a la compresión se tuvieron en cuenta las 16 probetas cilíndricas, de las cuales 12 fueron utilizadas para realizar el ensayo, es decir tres ensayos por cada concentración de sal.

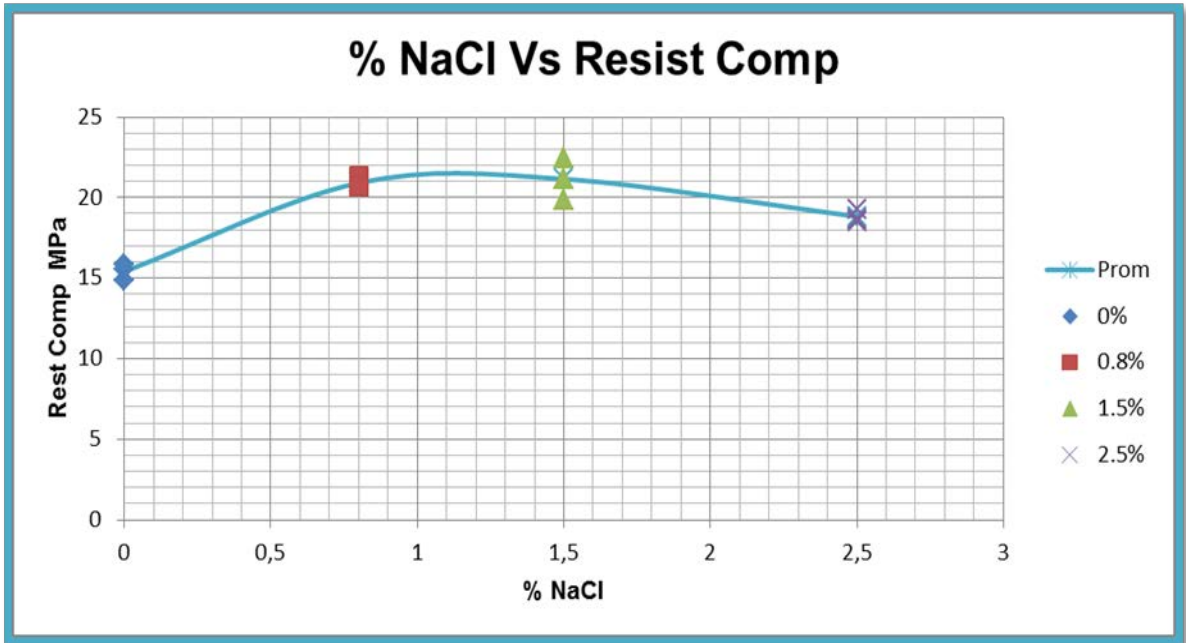
En la Tabla 15 y Gráfica 8, se aprecia los valores de resistencia a la compresión para probetas cilíndricas a los 28 días de curado, y comportamiento seguido por los mismos respectivamente.

Tabla 15. Resistencia a la compresión a los 28 días, probetas cilíndricas.

	Resist Comp Mpa	Resis Comp Kg/cm2
0%	14,86817595	151,6107902
0%	15,5477797	158,5407096
0%	15,82190018	161,3359161
Prom	15,41261861	157,162472
Desv Estand	0,491018194	5,006912527
0.8%	20,68575799	210,9326743
0.8%	21,29610049	217,1563367
0.8%	20,72749047	211,3582204
Prom	20,90311632	213,1490771
Desv Estand	0,340973342	3,476905164
1.5%	19,8563522	202,4752234
1.5%	22,45221364	228,9452225
1.5%	21,14427866	215,6082095
Prom	21,15094817	215,6762185
Desv Estand	1,297943568	13,23513056
2.5%	19,28859887	196,6858427
2.5%	18,53512985	189,0027191
2.5%	18,67156231	190,3939208
Prom	18,83176368	192,0274942
Desv Estand	0,401468868	4,093778045

Fuente: Los autores.

Gráfica 8. Resistencia a la compresión con respecto al contenido de NaCl a los 28 días de curado de probetas cilíndricas.

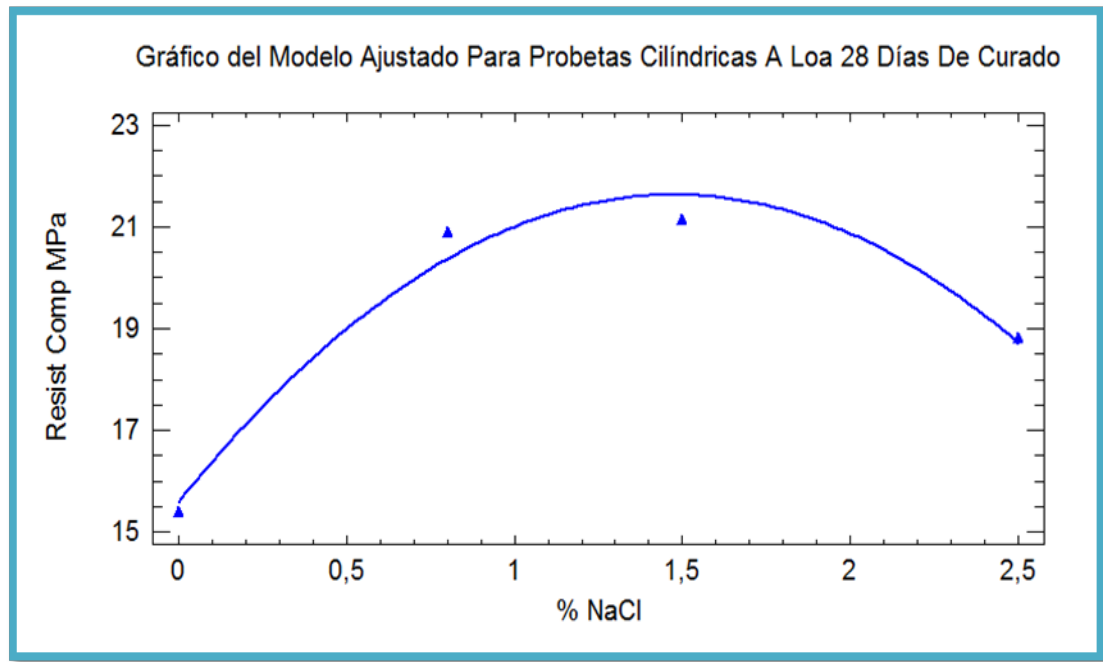


Fuente: Los autores.

Gráficamente se puede apreciar que la pendiente de 0% a 0.8% de NaCl es mayor a la pendiente de 1.5% a 2.5% de NaCl.

Se realizó un análisis comparando valores de correlación para diferentes tipos de regresión entre a resistencia a la compresión y el porcentaje de sal en las probetas, donde finalmente se escogió la regresión polinómica de orden dos, en el programa STATGRAPHICS, para ajustar los resultados obtenidos en las probetas cilíndricas a los 28 días de curado (ver Gráfica 9).

Gráfica 9. Ajuste de modelo polinómico grado dos para describir la relación entre la resistencia a la compresión y el % NaCl en probetas cilíndricas a los 28 días de curado.



Fuente: Los autores

Los resultados de ajustar un modelo polinómico de segundo orden para describir la relación entre la resistencia a la compresión y el % de NaCl en probetas cilíndricas a los 28 días de curado arroja un R-cuadrado de 97,3372%.

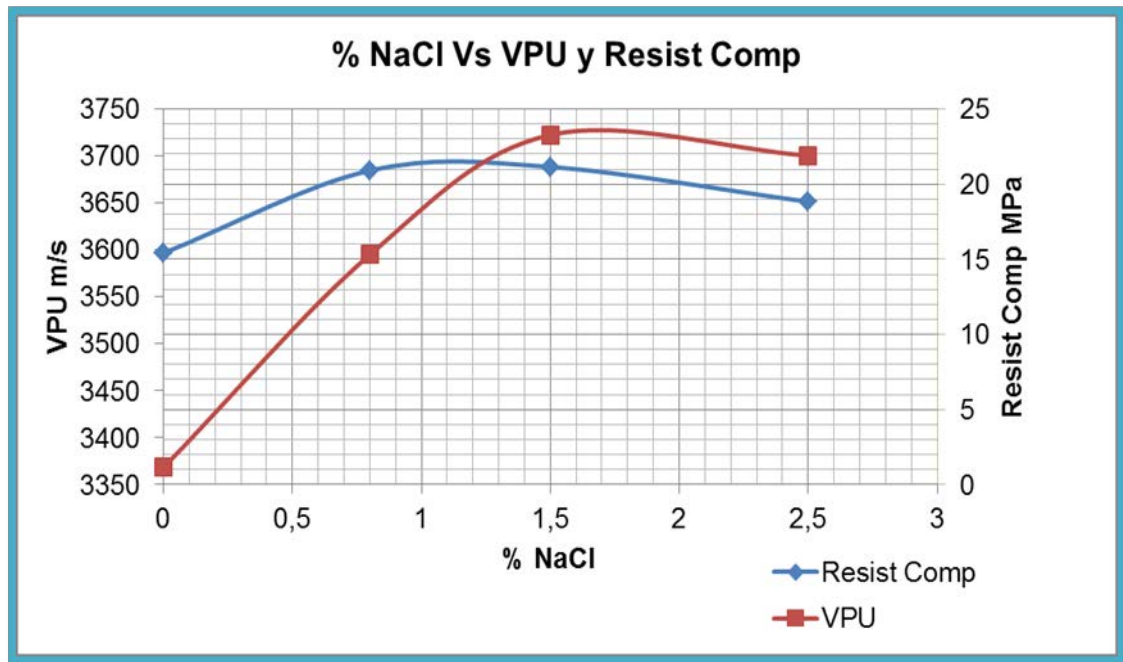
El estadístico R-Cuadrado indica que el modelo así ajustado explica 97,3362% de la variabilidad en la resistencia a la compresión, para este caso no existe una relación estadísticamente significativa entre la resistencia a la compresión y el % NaCl, con un nivel de confianza del 95% o mayor.

La ecuación del modelo ajustado es:

$$\mathbf{Resist\ Comp = 15,5821 + 8,21041 * \% NaCl - 2,78336 * \% NaCl^2}$$

A continuación se presenta la gráfica 10, donde se describen los comportamientos de VPU y resistencia a la compresión, al variar el contenido de NaCl.

Gráfica 10. %NaCl Vs VPU y Resistencia a la compresión promedio.



Fuente: Los autores.

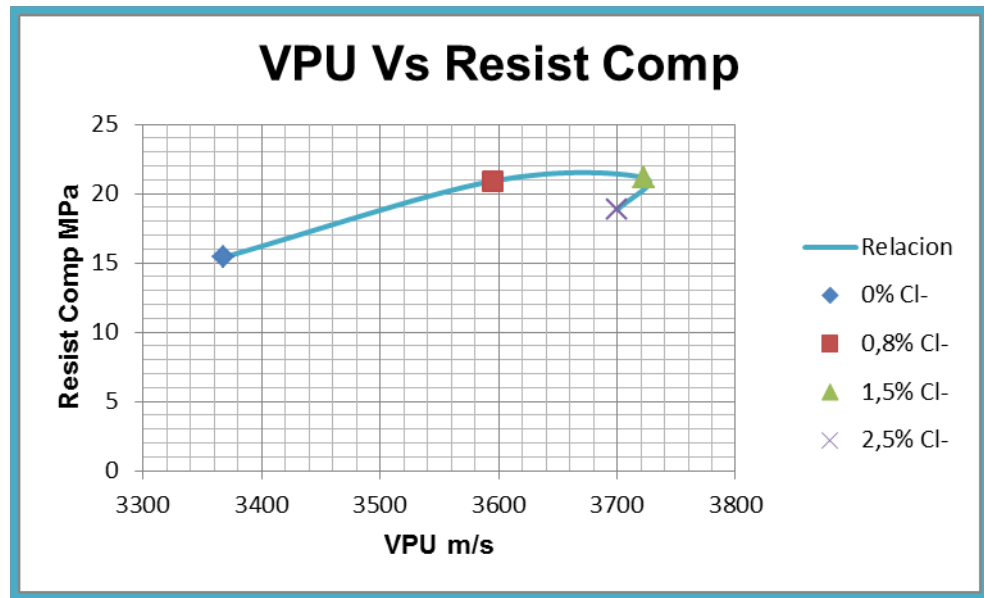
Las observaciones encontradas fueron las siguientes:

- En el rango de 0% a 0,8% de NaCl, se observa un acenso tanto en la VPU como en la resistencia a la compresión, teniendo la VPU una pendiente mayor, lo cual indica que la VPU presenta una mayor sensibilidad a la variación del porcentaje de sal en las probetas estudiadas.
- En el rango de 0,8% a 1,5% de NaCl, se encuentra un punto de corte entre la curva de VPU y resistencia a la compresión. La curva de resistencia a la compresión empieza a disminuir su pendiente antes del punto de corte (1,3% de NaCl, 21 MPa), por el contrario la curva de VPU realiza una disminución en la pendiente posterior al punto de corte (1,3% de NaCl, 3700 m/s).

- En el rango de 1,5% a 2,5% de NaCl, se observa una similitud en el comportamiento de las pendientes, donde su valor pasa a ser negativo (en descenso), y se observan con un comportamiento paralelo.

A continuación se observa una relación directa entre la VPU y la resistencia a la compresión para las probetas a los 28 días de curado (ver Gráfica 11).

Gráfica 11. VPU Vs Resistencia a la compresión a los 28 días de curado de probetas cilíndricas.



Fuente: Los autores.

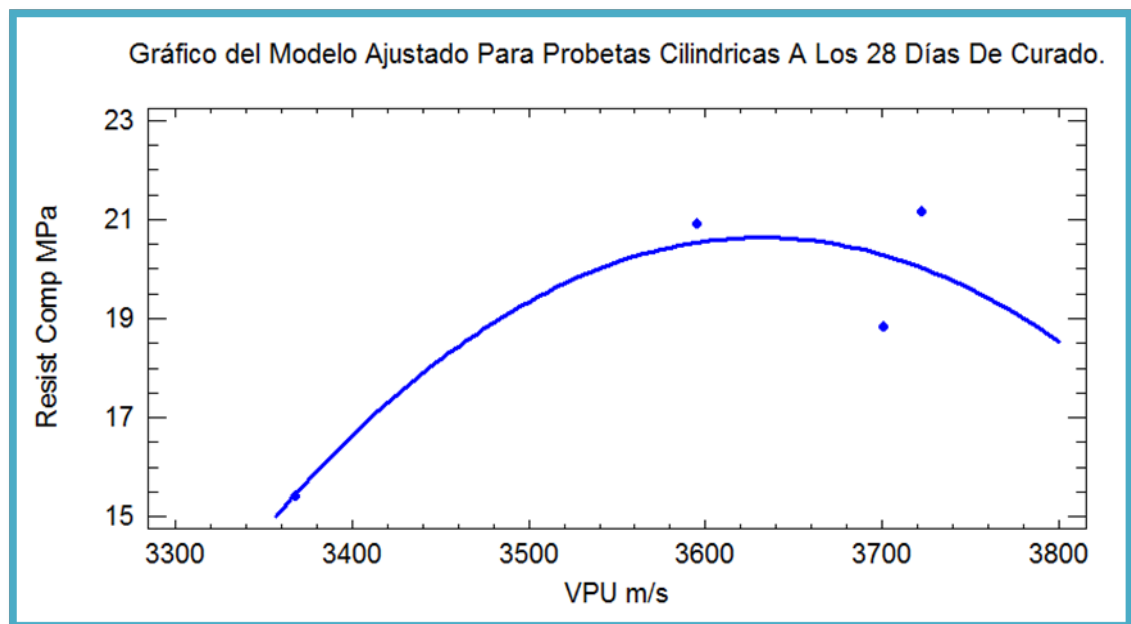
Como se mencionó anteriormente en el análisis de la Gráfica 10, observando la Gráfica 11, se puede apreciar de una manera más directa el comportamiento de la pendiente a medida que se aumenta el contenido de NaCl en las probetas, en el punto (3700 m/s, 21 MPa), se aprecia el cambio de pendiente y la disminución tanto de la VPU como de la resistencia a la compresión.

Este cambio en la pendiente nos permite afirmar que entre 0,8% y 1,5% de adición de NaCl respecto al peso del cemento al agua de elaboración del concreto, genera

una mayor resistencia a la compresión en comparación con una adición de NaCl de 2,5%.

Utilizando STATGRAPHICS, se realizó un análisis comparando valores de correlación para diferentes tipos de regresión entre a resistencia a la compresión y la velocidad de pulso ultrasónico en probetas cilíndricas a los 28 días de curado, donde finalmente se escogió la regresión polinómica de orden dos, para ajustar los resultados obtenidos (ver Gráfica 12).

Gráfica 12. Ajuste de modelo polinómico de orden dos para describir la relación entre la resistencia a la compresión y la velocidad de pulso ultrasónico en probetas cilíndricas a los 28 días de curado.



Fuente: Los autores.

Los resultados de ajustar un modelo polinómico de segundo orden para describir la relación entre la resistencia a la compresión y la velocidad de pulso ultrasónico en probetas cilíndricas a los 28 días de curado nos arroja un R-cuadrado de 83,3242 %.

El estadístico R-Cuadrado indica que el modelo así ajustado explica 83,3242% de variabilidad en la resistencia a la compresión, para este caso no existe una relación estadísticamente significativa entre la resistencia a la compresión y el % NaCl, con un nivel de confianza del 95% o mayor.

La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{Resist Comp} = -963,641 + 0,542037 * \text{VPU} - 0,0000746243 * \text{VPU}^2$$

4.3.2 Difracción de Rayos X

En las tablas 16, 17 y 18, se presentan los resultados obtenidos por medio de la técnica difracción de rayos X.

Tabla 16. Fases presentes en muestra con 0,0 % de NaCl.

	FASE	No. TARJETA PDF-2	NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalinos	Si O ₂	000-46-1045	Cuarzo	18.4 % (D.E = 0.3)
	Ca CO ₃	000-05-0586	Calcita	12.9 % (D.E = 0.5)
	Na _{0,996} (Al _{1,005} Si _{2,995} O ₃)	000-83-1466	Albita	8.3 % (D.E = 0.3)
	K Al ₂ (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂	000-07-0025	Moscovita	8.5 % (D.E = 0.4)
	Ca (OH) ₂	000-44-1481	Portlandita	6.8 % (D.E = 0.2)
	Ca ₆ (Al (OH) ₆) ₂ (SO ₄) ₃ (H ₂ O) ₂₆	000-41-1451	Ettringita	3.4 % (D.E = 0.2)
	Ca SO ₄ (H ₂ O) ₂	000-76-1746	Yeso	4.2 % (D.E = 0.2)
	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	000-83-0971	Caolinita	6.4 % (D.E = 0.3)
	Mg ₆ Fe ₂ (OH) ₁₆ (CO ₃) (H ₂ O) ₄	000-86-0182	Plogrenita	0.6 % (D.E = 0.1)
	CaMg(CO ₃) ₂	000-36-0426	Dolomita	3.7 % (D.E = 0.3)
	Ca ₂ Si O ₄	000-33-0302	Larnita	5.8 % (D.E = 0.3)
	K Al Si ₂ O ₃	000-71-1540	Ortoclasa	10.4 % (D.E = 0.5)
Total Cristalino				89.4 %
Amorfos y otros				10.6 %

Fuente: Laboratorio de Difracción de Rayos X. Universidad Industrial de Santander

Tabla 17. Fases presentes en muestra con 1,5 % de NaCl.

	FASE	No. TARJETA PDF-2	NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalinos	Si O ₂	000-46-1045	Cuarzo	18.3 % (D.E = 0.3)
	Ca CO ₃	000-05-0586	Calcita	13.2 % (D.E = 0.3)
	(Na _{0.98} Ca _{0.02}) (Al _{1.02} Si _{2.98} O ₈)	000-70-3752	Albita	4.6 % (D.E = 0.4)
	K Al ₂ (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂	000-07-0025	Moscovita	5.9 % (D.E = 0.4)
	Ca (OH) ₂	000-44-1481	Portlandita	4.5 % (D.E = 0.1)
	Ca ₆ (Al (OH) ₆) ₂ (SO ₄) ₃ (H ₂ O) ₂₆	000-41-1451	Ettringita	1.8 % (D.E = 0.1)
	Al ₂ Si ₂ O ₇ (OH) ₂	000-75-1500	Saenlita	3.8 % (D.E = 0.2)
	Ca ₈ Al ₄ (OH) ₂₄ (CO ₃) ₂ (H ₂ O) _{1.6} (H ₂ O) ₈	000-78-2050	Hidrocalumita	2.9 % (D.E = 0.1)
	CaMg(CO ₃) ₂	000-36-0420	Dolomita	3.0 % (D.E = 0.2)
	SiO ₂	000-82-1234	Cristobalita	N.C
	Ca ₂ Si O ₄	000-33-0302	Larnita	4.2 % (D.E = 0.2)
	K Al Si ₂ O ₈	000-71-1540	Ortoclasa	3.0 % (D.E = 0.3)
Total Cristalino				65.2 %
Amorfos y otros				34.8%

Fuente: Laboratorio de Difracción de Rayos X. Universidad Industrial de Santander.

Tabla 18. Fases presentes en muestra con 2,5 % de NaCl.

	FASE	No. TARJETA PDF-2	NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalinos	Si O ₂	000-46-1045	Cuarzo	25.1 % (D.E = 0.3)
	Ca CO ₃	000-05-0586	Calcita	17.7 % (D.E = 0.3)
	(Na _{0.98} Ca _{0.02}) (Al _{1.02} Si _{2.98} O ₈)	000-70-3752	Albita	8.5 % (D.E = 0.2)
	K Al ₂ (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂	000-07-0025	Moscovita	6.5 % (D.E = 0.4)
	Ca (OH) ₂	000-44-1481	Portlandita	6.6 % (D.E = 0.1)
	Ca ₆ (Al (OH) ₆) ₂ (SO ₄) ₃ (H ₂ O) ₂₆	000-41-1451	Ettringita	2.1 % (D.E = 0.1)
	Al ₂ Si ₂ O ₇ (OH) ₂	000-75-1500	Saenlita	5.2 % (D.E = 0.2)
	Ca ₈ Al ₄ (OH) ₂₄ (CO ₃) ₂ (H ₂ O) _{1.6} (H ₂ O) ₈	000-78-2050	Hidrocalumita	4.9 % (D.E = 0.2)
	Ca Mg(CO ₃) ₂	000-36-0420	Dolomita	3.5 % (D.E = 0.2)
	SiO ₂	000-82-1234	Cristobalita	N.C
	Ca ₂ Si O ₄	000-33-0302	Larnita	5.8 % (D.E = 0.2)
	K Al Si ₂ O ₈	000-71-1540	Ortoclasa	5.7 % (D.E = 0.3)
Total Cristalino				91.6 %
Amorfos y otros				8.4 %

Fuente: Laboratorio de Difracción de Rayos X. Universidad Industrial de Santander.

De la observación de las tablas, se puede apreciar la presencia de la fase hidrocalumita aumentó de 2.9% en la muestra de 1.5% de NaCl a 4.9% en la muestra de 2.5%. La formación de esta fase se le atribuye a la presencia de NaCl, ya que en las probetas fabricadas con 0,0% de NaCl esta fase no formó (Tabla 16).

En el ANEXO B, se puede encontrar los resultados obtenidos en el ensayo de Difracción de Rayos X y la caracterización química de la Hidrocalumita se encuentra en el ANEXO E.

4.3.3 Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X de Energía Dispersiva

A continuación, en las tablas 19, 20 y 21, se presentan los resultados obtenidos por este método para el cemento y las muestras extraídas de las probetas con 1,5 y 2,5 % de NaCl.

Tabla 19. Análisis del cemento por la Técnica de Espectrometría de Fluorescencia de Rayos-X de Energía Dispersiva

Composición					
Nombre	Analito(óxido)	Resultado (%)	Analito	Resultado (%)	Des. Estándar
Calcio	CaO	48.57	Ca	34.69	0.07
Silicio	SiO ₂	13.07	Si	6.11	0.06
Aluminio	Al ₂ O ₃	3.65	Al	1.93	0.05
Azufre	SO ₃	2.621	S	1.048	0.017
Hierro	Fe ₂ O ₃	2.098	Fe	1.467	0.011
Magnesio	MgO	2.02	Mg	1.22	0.07
Titanio	TiO ₂	0.199	Ti	0.120	0.009
Potasio	K ₂ O	0.146	K	0.122	0.008
Estroncio	SrO	0.146	Sr	0.124	0.001
Cromo	Cr ₂ O ₃	0.023	Cr	0.016	0.004
Manganeso	MnO	0.021	Mn	0.016	0.003
Níquel	NiO	0.017	Ni	0.013	0.001
Cobre	CuO	0.016	Cu	0.013	0.001

Fuente: Laboratorio de Fluorescencia de Rayos X. C.D.P. de Joyería.

Tabla 20. Porcentaje de Cloro encontrado en la muestra con %NaCl de 1,5%.

Nombre	Analito(óxido)	Resultado (%)	Analito	Resultado (%)	Des. Estándar
Silicio	SiO ₂	31.63	Si	14.78	0.09
Calcio	CaO	30.72	Ca	21.94	0.05
Aluminio	Al ₂ O ₃	5.84	Al	3.09	0.06
Hierro	Fe ₂ O ₃	2.731	Fe	1.910	0.011
Azufre	SO ₃	1.859	S	0.744	0.015
Magnesio	MgO	1.24	Mg	0.75	0.06
Potasio	K ₂ O	0.755	K	0.020	0.010
Cloro	Cl	0.424	Cl	0.424	0.008
Sodio	Na ₂ O	0.4	Na	0.3	0.1
Titanio	TiO ₂	0.263	Ti	0.158	0.010
Cromo	Cr ₂ O ₃	0.101	Cr	0.069	0.004
Plomo	PbO	0.045	Pb	0.042	0.002
Manganeso	MnO	0.044	Mn	0.034	0.003
Estroncio	SrO	0.040	Sr	0.034	0.001
Zirconio	ZrO ₂	0.014	Zr	0.010	0.001
Cobre	CuO	0.012	Cu	0.010	0.001
Níquel	NiO	90	Ni	71	14
Zinc	ZnO	80	Zn	64	8
Arsenico	As ₂ O ₃	62	As	46	8
Rubidio	Rb ₂ O	29	Rb	26	4
Itrio	Y ₂ O ₃	27	Y	21	4
			O	Balance	---
			*L.O.I	23.9 (%)	---

*Pérdidas por ignición (Loss on Ignition)

Fuente: Laboratorio de Fluorescencia de Rayos X. Centro de Desarrollo Productivo de Joyería.

En la tabla 19, se muestra la composición del cemento, la cual verifica que no hay presencia de cloro en el mismo.

En la tabla 20 y 21, se muestran los elementos presentes en las muestras con 1.5% y 2.5% de NaCl, se observa la presencia de Cloro con un porcentaje de 0.424 y 0.479 % respectivamente.

Tabla 21. Porcentaje de Cloro encontrado en la muestra con %NaCl de 2,5%.

Nombre	Analito(óxido)	Resultado (%)	Analito	Resultado (%)	Des. Estándar
Silicio	SiO ₂	34.64	Si	16.19	0.09
Calcio	CaO	30.83	Ca	22.02	0.05
Aluminio	Al ₂ O ₃	7.55	Al	4.00	0.07
Hierro	Fe ₂ O ₃	3.311	Fe	2.315	0.013
Azufre	SO ₃	1.445	S	0.578	0.014
Magnesio	MgO	1.43	Mg	0.86	0.06
Potasio	K ₂ O	1.057	K	0.001	0.012
Cloro	Cl	0.479	Cl	0.479	0.009
Sodio	Na ₂ O	0.5	Na	0.5	0.2
Titanio	TiO ₂	0.410	Ti	0.247	0.011
Manganeso	MnO	0.053	Mn	0.041	0.003
Estroncio	SrO	0.041	Sr	0.035	0.001
Plomo	PbO	0.026	Pb	0.024	0.002
Cromo	Cr ₂ O ₃	0.020	Cr	0.014	0.004
Cobre	CuO	0.016	Cu	0.013	0.001
Zirconio	ZrO ₂	0.012	Zr	0.009	0.001
Níquel	NiO	62	Ni	49	14
Zinc	ZnO	57	Zn	46	9
Arsenico	As ₂ O ₃	44	As	33	7
Rubidio	Rb ₂ O	35	Rb	32	5
Itrio	Y ₂ O ₃	27	Y	22	4
			O	Balance	---
			*L.O.I	18.2 (%)	---

*Pérdidas por ignición (Loss on Ignition)

Fuente: Laboratorio de Fluorescencia de Rayos X. Centro de Desarrollo Productivo de Joyería.

Teniendo en cuenta que a las muestras se les realizó una calcinación a 1000°C antes de realizar el ensayo de fluorescencia, se puede afirmar que el cloro que mostrado en los resultados corresponde al presente en la fase hidrocálumita encontrada en los resultados del ensayo de difracción de rayos X anteriormente mostrados.

Los porcentajes de cloro encontrados en el ensayo de fluorescencia de rayos X, para las muestras con 1,5 y 2,5 % de NaCl, se pueden corroborar con la información suministrada por el IV Coloquio de Química del Cemento [3], donde se

estima que aproximadamente un 0,4% del cloruro con respecto al peso del cemento puede llegar a combinarse.

En las muestras analizadas se encontraron valores cercanos a este porcentaje como se mencionó anteriormente, lo cual es favorable ya que esto permite afirmar que el porcentaje restante es cloruro libre y físicamente absorbido.

5. CONCLUSIONES

A partir de la investigación realizada sobre concreto sin refuerzo con adiciones de sal de 0%, 0,8%, 1,5% y 2,5% y curado bajo techo en condiciones ambientales, se puede concluir que:

La velocidad de pulso ultrasónico es sensible a la presencia de sal en las probetas fabricadas con NaCl en el agua de elaboración, mostrando un aumento significativo en el intervalo entre 0% y 1,5%, concentración a partir de la cual presenta una leve disminución. Encontrando una correlación de la forma:

$VPU = (3383,47 + 230,228 * \sqrt{\% \text{ NaCl}})$, con un coeficiente de correlación del 92,72%.

La resistencia a la compresión aumentó al incrementar el contenido de sal en el intervalo de 0% a 0,8%, con una pendiente mayor que para el intervalo de 0,8% a 1,5%. A partir de 1,5%, presentó disminución leve. Se encontró una correlación de la forma: $Rc = 15,5821 + 8,21041 * \% \text{ NaCl} - 2,78336 * \% \text{ NaCl}^2$, con un coeficiente de correlación del 97,33%.

Tanto la VPU como la resistencia a la compresión presentan aumento en sus valores hasta aproximadamente 1,5% del contenido de sal, mostrándose una mayor pendiente para la VPU, lo cual indica una mayor sensibilidad de esta, para captar un cambio del contenido de sal, en este intervalo.

Existe una relación entre la resistencia a la compresión y la VPU de forma polinómica de orden dos: $Rc = -963,641 + 0,542037 * VPU - 0,0000746243 * VPU^2$, con un coeficiente de correlación del 83,32%.

Los ensayos de difracción y fluorescencia de rayos X, permitieron encontrar la formación de una fase Hidrocalumita, la cual aumenta al aumentar el contenido de

sal en el concreto, y la existencia de un 0,4% aproximadamente de cloro químicamente enlazado respecto al peso del cemento.

Para las condiciones estudiadas, la velocidad de pulso ultrasónico es una técnica que puede evaluar y corroborar la presencia de cloruros en una estructura de concreto.

6. RECOMENDACIONES

Continuar con los estudios de evaluación de VPU en concreto con presencia de cloruros, haciendo énfasis en el análisis micro-estructural, difracción y fluorescencia de rayos X, empleando ambientes naturales y artificiales, como complemento al trabajo.

Realizar estudios de VPU y resistencia a la compresión empleando una gama amplia de concentración en el intervalo estudiado de concentraciones de sal utilizados, con el fin de valorar con más precisión el punto de inicio de pérdida de resistencia del material.

BIBLIOGRAFÍA

[1] CEMEX COLOMBIA < Disponible en http://www.cemexcolombia.com/np/np_ce.html > Visitado en Agosto de 2011

[2] GONZALEZ DE LA COTERA, Manuel; "LA CORROSIÓN DEL CONCRETO EN AMBIENTE MARINO"; ASOCEM, PERÚ; 1994.

[3] GONZALEZ DE LA COTERA, Manuel; "IV COLOQUIO DE QUÍMICA DEL CEMENTO: COMPORTAMIENTO DEL CEMENTO EN LA CORROSIÓN DEL ACERO POR CLORUROS EN EL CONCRETO ARMADO"; ASOCEM, Perú; 1994.

[4] Ueli Angst, Bernhard Elsener, Claus K. Larsen, Oystein Vennesland; CRITICAL CHLORIDE CONTENT IN REINFORCED CONCRETE – A REVIEW; Cement and Concrete Research 39 (2009) 1122 – 1138

[5] ASTM C1157 / C1157M - 10 Standard Performance Specification for Hydraulic Cement; 1990.

[6] SANCHEZ DE GUZMAN, Tecnología del Concreto y Mortero, Op. Cit., p. 22.

[7] Rómel G. Solís Carcaño, Éric Iván Moreno y William R. Castillo; PREDICCIÓN DE LA RESISTENCIA DEL CONCRETO CON BASE EN LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO Y UN INDICE DE CALIDAD DE LOS AGREGADOS; Pag. p. 43-44, 2004.

[8] Leslie y Cheesman; TECNOLOGÍA DEL HORMIGÓN, GRUPO DEL HORMIGÓN; Ingeniería en construcción, UCV; 1949.

[9] *Chávez Machado, Buendía Ríos; PERFILES DE PENETRACIÓN DE CLORURO EN ESTADO IÓNICO EN CONCRETOS DEL RANGO A/C 045 A 0,65. 2001*

[10] *Garbozzi, E.J. y Bentz, D.P. DETERMINATION OF THE COEFICIENT OF CHLORIDE ION DIFFUSION, pp. 1- 5. <http://ciks.cbt.gov/> 2006.*

[11] *GONZALEZ SANDOVAL, Mary Yorley; SANTANA SALAZAR, Laura Cristina; “SIMULACIÓN DE LA DIFUSIÓN DE IONES CLORURO EN UN ELEMENTO DE HORMIGÓN”, Trabajo para optar el título de ingeniero Civil; Area de Ensayos no Destructivos; Universidad Industrial de Santander.2008.*

[12] *GARCIA RODRIGUEZ, Nancy Andrea; “EVALUACION DEL EFECTO DE LA MICROSILICE SOBRE EL COEFICIENTE DE DIFUSION APARENTE DEL ION CLORURO EN CONCRETOS EXPUESTOS A AMBIENTES CON CLORUROS”, Trabajo para optar el título de Ingeniero Metalúrgico; Universidad Industrial de Santander, 2008.*

[13] *Ki Yong Ann, Ha-Won Song; CHLORIDE THRESHOLD LEVEL FOR CORROSION OF STEEL IN CONCRETE; Corrosion Science 49 (2007) 4113 – 4133.*

[14] *Vasquez Custorio, Peña Dario, Toloza Orlando; EXTRACCIÓN DE ELECTROQUÍMICA DE CLORUROS EN CONCRETO; Grupo de Investigaciones en Corrosión; Universidad Industrial de Santander, 2003.*

[15] *ARIZA DIAZ, Diana Marcela; ATUESTA ESPARZA, Javier Andres; “EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA RELACIÓN AGUA/CEMENTO, TAMAÑO DE AGREGADO Y TIEMPO DE CURADO SOBRE LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO EN CONCRETO SIN REFUERZO”, Trabajo para optar el título de*

ingeniero Metalúrgico; Area de Ensayos no Destructivos; Universidad Industrial de Santander, Grupo de Investigación GIMAT; 2010.

[16] *ASTM C150 / C150M - 11 Standard Specification for Portland Cement. 1980.*

[17] *EL AGUA DEL CONCRETO. < Disponible en: <http://elconcreto.blogspot.com/search/label/El%20Agua%20del%20Concreto> > Visitado en julio de 2011.*

[18] *ICONTEC, NTC 174, Norma Técnica Colombiana, Concretos. Especificaciones para los Agregados para Concreto; 2000.*

[19] *ICONTEC, NTC 121, Norma Técnica Colombiana, Ingeniería Civil y Arquitectura. Cemento Portland. Especificaciones Físicas y Mecánicas; 1982.*

[20] *O. Tronconis de Rincón, P. Castro, E. Moreno, A. Torres-Acosta, O. Morón de Bravo, I. Arrieta, C. Garcia, D. Garcia, M Martinez-Madrid; CHLORIDE PROFILES IN TWO MARINE STRUCTURES – MEANING AND SOME PREDICTIONS, Received 22 January 2004.*

[21] *Actualización tecnológica – Cloruros y aditivos, BASF <Disponible en: <http://www.basf-cc.com.mx/SiteCollectionDocuments/Boletines/CTU3-ClorurosYAditivos0309.pdf>> Visitado en Abril de 2011.*

[22] *ASTM C597 (2009). Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. Significance and Use.*

[23] *IAEA, GUIDEBOOK ON NON-DESTRUCTIVE TESTING OF CONCRETE STRUCTURES, Vienna, 2002. Pag 106-107*

[24] METODOS DE ENSAYOS ULTRASÓNICOS <Disponible en: <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/6154/8/07.pdf> > Visitado en Julio de 2011.

[25] KUMAR MEHTA, P. Y MONTEIRO, *Microstructure, Properties and Materials*. University of California at Berkeley. Third Edition. Mc Graw Hill. 2006. P. 3-8, 11-12, 27, 159, 207, 405.

[26] ICONTEC, NTC 321, Norma Técnica Colombiana, Ingeniería Civil Y Arquitectura. Cemento Portland. Especificaciones Químicas; 1982.

[27] ICONTEC, NTC 92, Norma Técnica Colombiana, Ingeniería Civil Y Arquitectura. Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregado compactado; 1995.

[28] ICONTEC, NTC 176. Norma Técnica Colombiana, Ingeniería Civil y Arquitectura. Método de Ensayo para Determinar la Densidad y Absorción del Agregado Grueso; 1995.

[29] ICONTEC, NTC 237, Norma Técnica Colombiana Ingeniería Civil y Arquitectura. Método de Ensayo para Determinar la Densidad y Absorción de Agregados Fino; 1995.

[30] ICONTEC, NTC 77, Norma Técnica Colombiana, Ingeniería Civil y Arquitectura. Método de Ensayo Para el Análisis por Tamizado de los Agregados Finos y Gruesos; 2007.

[31] ICONTEC, NTC 78, Norma Técnica Colombiana, Ingeniería Civil y Arquitectura. Método para Determinar por Lavado el Material que Pasa el Tamiz 75 μm en Agregados Minerales; 1995.

[32] ICONTEC, NTC 1377, Norma Técnica Colombiana, Ingeniería Civil y Arquitectura. Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos en el laboratorio; 1994.

[33] ICONTEC, NTC 673, Norma Técnica Colombiana, Ingeniería Civil y Arquitectura. Determinación de resistencia a la compresión de cilindros normales de concreto; 2010.

[34] R.D. Browne, DURABILITY OF BUILDING MATERIAL; Elsevier Scientifics Publications, 1982.

[35] ARGOS < Disponible en:
http://www.argos.co/site/DesktopModules/Bring2mind/DMX/Download.aspx?Command=Core_Download&EntryId=31&PortalId=0&TabId=64 > Visitado en Septiembre de 2011

[36] BRINSA S.A. REFISAL ALTA PUREZA < Disponible en:
<http://www.refisal.com.co/pages/productos/sabor/usuario/pdf/Alta%20pureza.pdf> > Visitado en marzo de 2011.

ANEXOS

ANEXO A. Cálculos para el diseño de mezcla

El diseño de mezcla utilizado para la realización, además de los porcentajes de NaCl utilizados en las probetas, se describen a continuación:

a) Diseño de Mezcla

El método utilizado para el diseño de mezcla de esta investigación corresponde al método de Diseño A.C.I. (American Concrete Institute), y se utiliza para determinar los contenidos de la pasta de cemento (cemento, agua y aire incluido), y agregados fino y grueso.

A continuación se describe el procedimiento formal para el método de diseño de mezcla A.C.I.

I. Selección del Asentamiento

El asentamiento del concreto es una característica que relaciona la cantidad de agua total presente en la mezcla. Los valores del asentamiento indicados son los aplicados cuando la vibración se utiliza en la compactación del concreto. Las mezclas deben utilizarse con la mínima consistencia que permita una colocación eficiente.

Tabla 1. Asentamiento recomendado para concretos de diferentes grados de manejabilidad.

CONSISTENCIA	ASENTAMIENTO [cm]	TIPO DE ESTRUCTURA Y CONDICIONES DE COLOCACIÓN
MUY SECA	0 - 2	Vigas prefabricadas de alta resistencia con vibraciones de formaleta.
SECA	2 - 3.5	Pavimentos con máquina terminadora vibratoria.
SEMI SECA	3.5 - 5	Pavimentos con vibraciones normales. Fundiciones de concreto simple. Construcciones en masas voluminosas. Losas medianamente reforzadas con vibración.
<u>MEDIA</u>	<u>5 - 10</u>	<u>Pavimentos compactados a mano. Losas medianamente reforzadas, columnas, vigas y muros reforzados con vibración</u>
HÚMEDA	10 - 15	Revestimiento de túneles. Secciones con demasiado refuerzo. Trabajar donde la colocación sea difícil. Nuevamente no es apropiado para compactarlo con demasiado.

Fuente. Tecnoconcreto S.A. Diseño de Mezclas

Según el objetivo de la investigación, se seleccionó un asentamiento de 5 a 10 tal y como se señala en la Tabla 1, teniendo en cuenta una consistencia media.

II. Selección de la relación agua-cemento

Debido a la importancia que tiene la relación agua/cemento para el diseño de mezcla de concreto, su selección se fundamenta principalmente sus propiedades tales como resistencia, durabilidad y acabado superficial. Puesto que el valor de resistencia a la compresión varía según sean los diferentes tipos de agregados y cementos a pesar de mantener la misma relación agua/cemento, se hace necesario estudiar variables fundamentales como: tamaño de agregado, textura superficial, forma, tiempo y tipo de curado o inclusión de algunos aditivos. Para esta investigación se eligió una relación agua-cemento igual a 0,5.

III. Selección del tamaño de agregado

Para la selección del tamaño máximo de agregado, se tiene en cuenta que en ningún caso el tamaño máximo deberá exceder de $1/5$ de la menor dimensión entre los lados de la formaleta.

Teniendo en cuenta que la formaleta cilíndrica tiene dimensiones de 200 mm de longitud por 100 mm de diámetro (50 mm de radio), y teniendo en cuenta la adición de porcentajes de NaCl en el agua de elaboración de la pasta de concreto respecto al peso del cemento, se estimó el tamaño máximo de agregado a utilizar igual a $3/8$ de pulgada (9.503 mm).

IV. Estimación del contenido de agua

Para poder determinar la cantidad necesaria de agua a utilizar se debe tener en cuenta que esta última dentro de la mezcla de concreto cumple dos funciones: hidratar el cemento, y producir la fluidez necesaria. Por lo tanto, la estimación de esta cantidad está sujeta al tipo de asentamiento que se quiera producir y el tamaño máximo de agregado con el cual se va a trabajar.

La Tabla 2 señala las estimaciones del contenido de agua en la mezcla de concreto según el tamaño máximo de agregado fino y grueso, además del asentamiento con aire incluido y sin él.

Tabla 2. Agua en Kilogramos por metro cúbico de concreto para los tamaños máximos de agregados indicados.

CONCRETO SIN AIRE INCLUIDO							
Asentamiento (cm)	10mm	13mm	20mm	25mm	40mm	50mm	75mm
3 a 5	205	200	185	180	160	155	145
5 a 10	225	215	200	195	175	170	180
15 a 18	240	230	210	205	185	180	170
Contenido de aire (%)	3	2,3	2	1,5	1	0,5	0,3

CONCRETO SIN AIRE INCLUIDO							
Asentamiento (cm)	10mm	13mm	20mm	25mm	40mm	50mm	75mm
3 a 5	180	175	165	160	145	140	135
5 a 10	200	190	180	175	165	155	150
15 a 18	215	205	190	185	170	165	160
Contenido de aire (%)	8	7	6	5	4,5	4	3,5

Fuente. Tecnoconcreto S.A. Diseño de Mezclas

Los cálculos obtenidos (teniendo en cuenta un diseño de mezcla para $1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ L}$), el contenido de agua a utilizar fue de 216,0 Kg con una densidad de 1000,0 Kg/m^3 y un Volumen de $0,2160 \text{ m}^3$.

V. Estimación del contenido de cemento

La cantidad de cemento por unidad de volumen de concreto se obtiene a partir de la relación agua cemento y del contenido de agua encontrado en el paso anterior.

Por medio de la siguiente ecuación:

$$C = \frac{a}{a/c}$$

Ecuación (1)

Según los cálculos (teniendo en cuenta un diseño de mezcla para $1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ L}$), el contenido de cemento a utilizar fue de 432 Kg con una densidad de $3030,0 \text{ Kg/m}^3$ y un volumen de $0,1426 \text{ m}^3$.

VI: Estimación del contenido de agregado grueso

Para determinar la cantidad de agregado grueso necesario para el diseño de mezcla, se tiene en cuenta la tabla 3. En ella encontramos el coeficiente b/b_0 en función del tamaño máximo nominal del agregado grueso y del módulo de finura del agregado fino.

El coeficiente b/b_0 se define como la relación entre la masa unitaria seca y compactada y la densidad aparente seca del agregado grueso.

Tabla 3. Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto.

TAMAÑO MÁXIMO DE AGREGADO (mm)	VOLUMEN DE AGREGADO GRUESO, SECO Y COMPACTADO CON VARILLA, POR VOLUMEN UNITARIO DE CONCRETO PARA DIFERENTES MÓDULOS DE FINURA DE LA ARENA			
	2.40	2.60	2.80	3.00
10	0.50	0.48	0.46	0.44
13	0.59	0.57	0.55	0.53
20	0.66	0.64	0.62	0.60
25	0.71	0.69	0.67	0.65
40	0.75	0.73	0.71	0.69
50	0.78	0.76	0.74	0.72
75	0.81	0.79	0.77	0.75
150	0.87	0.85	0.83	0.81

Fuente: Tecnoconcreto S.A. Diseño de mezclas.

Después de conocer el valor de b/b_0 , se procede a calcular el peso absoluto del agregado grueso por volumen unitario de concreto.

Por medio de la expresión:

$$b = \left(\frac{b}{b_0} \right) \times b_0$$

Ecuación (2)

Siendo:

b = Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto.

b_0 = Volumen seco y compactado de agregado grueso por volumen unitario de concreto

b/b_0 = Relación entre la masa unitaria seca y compactada y la densidad aparente seca del agregado grueso.

Podemos conocer el valor del volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto.

Los cálculos obtenidos (teniendo en cuenta un diseño de mezcla para $1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ L}$), el contenido de agregado grueso a utilizar fue de 792,991 Kg con una densidad de 2584,0 Kg/m³ y un volumen de 0,3069 m³.

VII. Estimación del contenido de agregado fino

El volumen de agregado fino a utilizar en la mezcla se calcula sumando el volumen de cada uno de los componentes (agua, agregado grueso y cemento en m³), y luego restarlos con un metro cúbico (1 m³) de concreto.

Por medio de la expresión:

$$V_{af} = 1000 - (V_a + V_c + V_{ag})$$

Ecuación (3)

Siendo:

V_{af} = Volumen de agregado fino

V_a = Volumen de agua

V_c = Volumen de cemento

V_{ag} = Volumen de agregado grueso (Cantidad de agregado grueso / densidad aparente agregado grueso)

Entonces se procedió a recopilar los volúmenes encontrados en los anteriores cálculos para encontrar el volumen de 1 m³ de agregado fino:

V_{af} =

$$\mathbf{V_a} = 0,2160 \text{ m}^3$$

$$\mathbf{V_c} = 0,1426 \text{ m}^3$$

$$\mathbf{V_{ag}} = 0,3069 \text{ m}^3$$

Por medio de la ecuación (3):

$$\mathbf{V_{af}} = 0,3345 \text{ m}^3$$

Los cálculos obtenidos (teniendo en cuenta un diseño de mezcla para 1 m³ = 1000 L), el contenido de agregado fino a utilizar fue de 879,842 Kg con una densidad de 2630,0 Kg/m³ y un volumen de 0,3345 m³.

En la Tabla 4, se recopila todos los datos anteriormente calculados y se expresa el diseño de mezcla calculado para 1 m³ de concreto:

Tabla 4. Diseño de mezcla para 1 m³ de concreto.

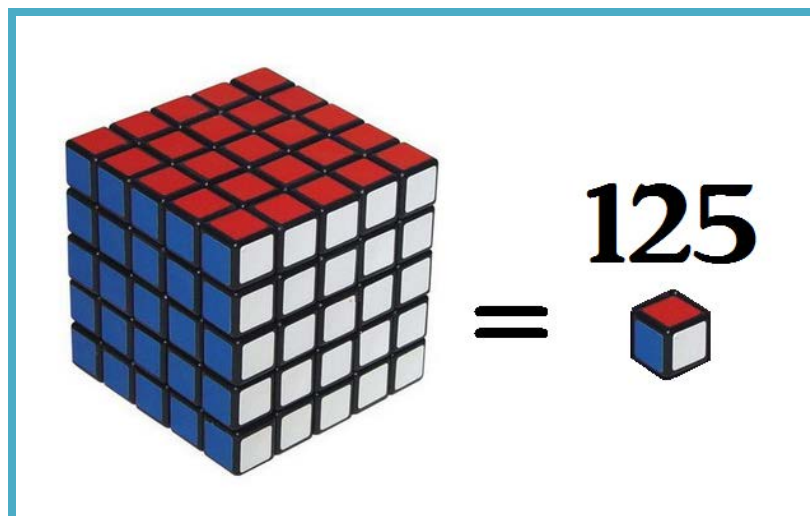
CONSTITUYENTE	MASA (Kg)	DENSIDAD (Kg/m ³)	VOLUMEN (m ³)
AGUA	1,728	1000,0	0,2160
CEMENTO	3,456	3030,0	0,1426
AGREGADO GRUESO	6,344	2584,0	0,3069
AGREGADO FINO	7,04	2630,0	0,3345
TOTAL			1,0000

Fuente: Los autores.

Utilizando el diseño de mezcla mostrado en la Tabla 4, se realizó el cálculo para el contenido de cada constituyente para una probeta cúbica y cilíndrica.

Para las probetas cúbicas, se dividió cada valor equivalente de masa en kilogramos entre 125, teniendo en cuenta que matemáticamente en 1 m³ de concreto se pueden extraer 125 probetas de 20 x 20 x 20 cm (Gráfica 1).

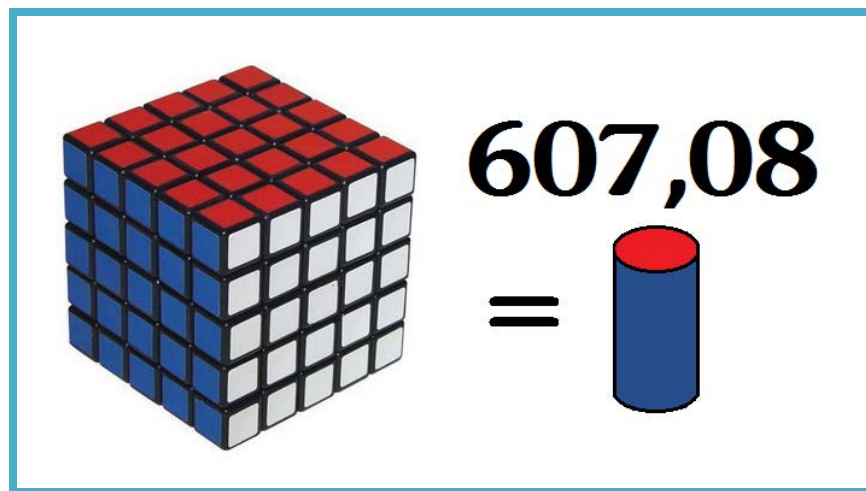
Gráfica 1. Relación de 1 m³ de concreto y 125 probetas de 20 x 20 x 20 cm³.



Fuente: Los autores.

Para las probetas cilíndricas, se calculó matemáticamente el peso en Kg de cada constituyente, teniendo en cuenta los valores conocidos para un diseño de mezcla de 1 m^3 de concreto. Asumiendo el volumen ocupado por una probeta cilíndrica, se encontró que para 1 m^3 de concreto se pueden realizar aproximadamente 607,08 probetas cilíndricas. Esta relación se describe visualmente en la Grafica 2.

Gráfica 2. Relación de 1 m^3 de concreto y 607,08 probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura.



Fuente: Los autores.

b) Cálculo de Porcentajes de NaCl para cada tipo de probeta

El cálculo de los porcentajes de NaCl utilizados en esta investigación se determinó a partir de la literatura, que afirma acerca de determinados porcentajes del ion cloruro en su estructura interna, tienen un efecto dañino en el refuerzo interno de la estructura de concreto. Para efectos de esta investigación, la Tabla 5 describe el efecto de los porcentajes de ion cloruro y su efecto en la corrosión del refuerzo.

Tabla 5. Efecto de las concentraciones de ión cloruro en estructuras de concreto con refuerzo.

PORCENTAJE DE ION CLORURO PRESENTE EN LA ESTRUCTURA	EFECTO CORROSIVO EN EL REFUERZO INTERNO
0.0%	Ninguno
0,8%	Posible
1,5%	Probable
2,5%	Significante

Fuente: DURABILITY OF BUILDING MATERIALS [34].

Los porcentajes de NaCl se calcularon respecto al peso del cemento presente en el diseño de mezcla para una probeta cúbica y una probeta cilíndrica.

- **Probeta cúbica**

La elaboración de una probeta de 20 x 20 x 20 cm, requiere aproximadamente 3,456 Kg de cemento Portland Tipo I. En base a este peso, se realizó el cálculo de los porcentajes de NaCl para 0,8%, 1,5% y 2,5%, como se indica en la Tabla 6.

Tabla 6. Cantidad de NaCl para una probeta de 20 x 20 x 20 cm respecto al peso del cemento.

PORCENTAJE DE ION CLORURO RESPECTO AL CEMENTO	PESO DE NaCl PARA UNA PROBETA CÚBICA (gr)
0.0%	0,0 gr
0,8%	27,65 gr
1,5%	51,84 gr
2,5%	86,4 gr

Fuente: Los autores.

- **Probeta cilíndrica**

La elaboración de una probeta cilíndrica de 10 cm de diámetro y 20 cm de longitud, requiere aproximadamente 711,7 gr de cemento Portland Tipo I. En base a este peso, se realizó el cálculo de los porcentajes de NaCl para 0,8%, 1,5% y 2,5% como se observa en la Tabla 7.

Tabla 7. Cantidad de NaCl para una probeta cilíndrica respecto al peso del cemento.

PORCENTAJE DE ION CLORURO RESPECTO AL CEMENTO	PESO DE NaCl PARA UNA PROBETA CILÍNDRICA (gr)
0.0%	0,0 gr
0,8%	5,6936 gr
1,5%	10,6755 gr
2,5%	17,7925 gr

Fuente: Los autores.

ANEXO B. Resultado del Análisis de Difracción de Rayos X

METODOLOGÍA

La metodología seguida para el análisis de difracción de rayos X fue la siguiente:

- **Preparación y montaje de las muestras**

Las muestras fueron pulverizadas en un mortero de ágata y llevadas a un tamaño de 38 μm (malla 400). El espécimen seleccionado de cada muestra fue montado en una porta-muestra mediante la técnica de llenado frontal.

- **Toma de datos de difracción**

Se realizó en un difractómetro de polvo marca SIEMENS modelo D500 bajo las siguientes condiciones:

Tabla 1. Parámetros del ensayo de Difracción de Rayos X

Voltaje	400 KV
Corriente	30 mA
Rendija de Divergencia	0.15 mm
Rendijas Soller Primario	2°
Muestreo	0.02° 2 theta
Rango de Medición	2-70° 2 theta
Radiación	CuK α 1
Monocromador	Grafito
Detector	Centello
Tipo de barrido	Continua
Tiempo de muestreo	1 Segundo

Fuente: Laboratorio de Difracción de Rayos X Universidad Industrial de Santander.

- **Tipo de Análisis**

Se usaron 2 tipos de análisis para la obtención de resultados:

Análisis Cualitativo

El análisis cualitativo de las fases presentes en la muestra se realizó mediante comparación del perfil observado con los perfiles de difracción reportados en la base de datos PDF-2 del International Centre for Diffraction Data (ICDD).

Análisis Cuantitativo

El análisis cuantitativo de las fases encontradas se realizó mediante el refinamiento por el Método de Rietveld del perfil observado habiéndole agregado a la muestra una cantidad conocida de un estándar interno (Aluminum oxide, -malla 100, 99%. Corundum, a-phase. Aldrich No. 23,474-5) correspondiente al 20%.

RESULTADOS

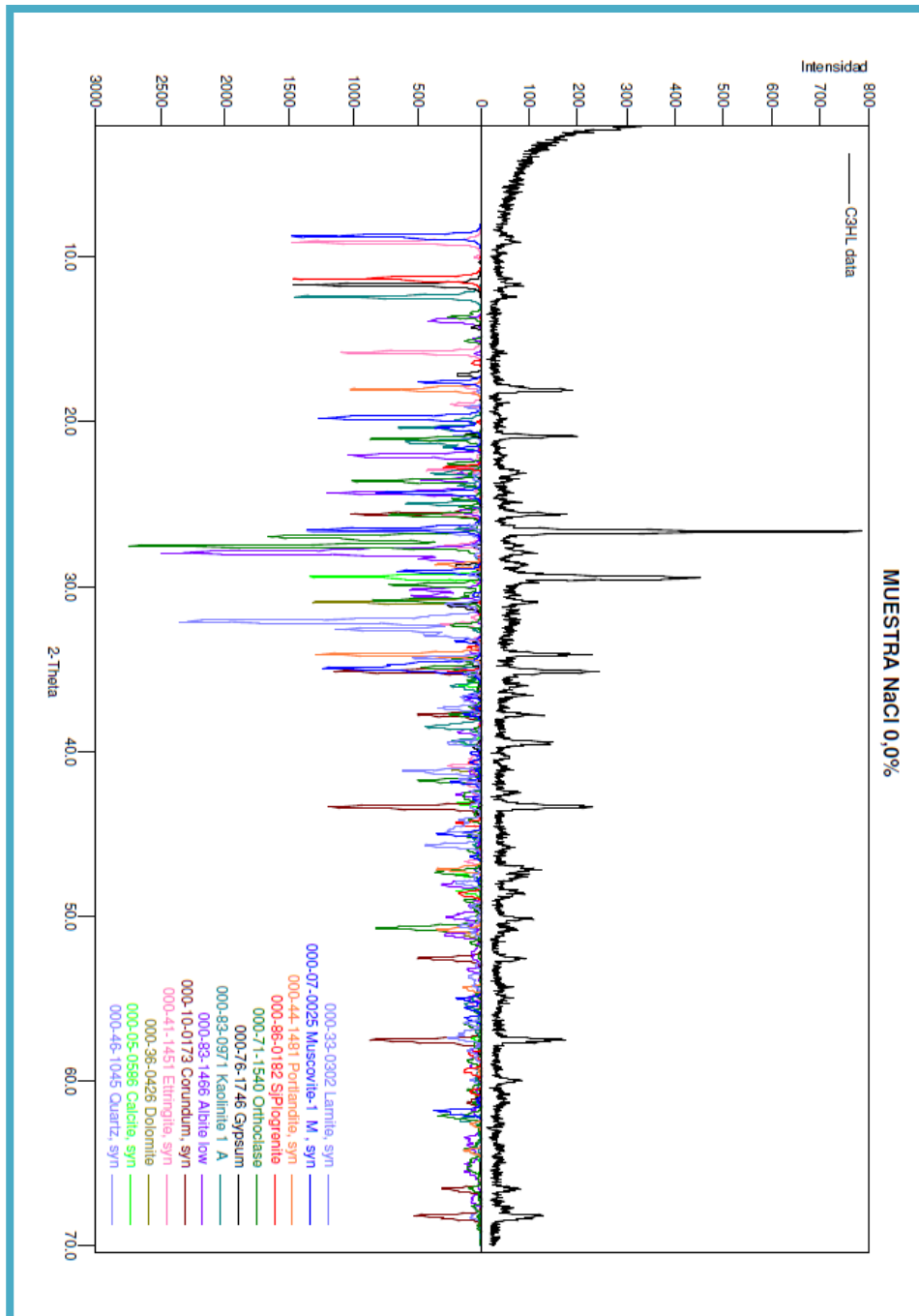
Los resultados obtenidos para las muestra con 0,0% de NaCl se enseña en la Tabla 2. Las Figura 1,2 y 3 muestran los espectros de difracción de Rayos X para cada una de las muestras utilizadas en la investigación.

Tabla 2. Análisis de Difracción de Rayos X a muestra de concreto con adición de NaCl igual a 0,0% (C3HL)

	FASE	No. TARJETA PDF-2	NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalinos	Si O ₂	000-46-1045	Cuarzo	18.4 % (D.E = 0.3)
	Ca CO ₃	000-05-0586	Calcita	12.9 % (D.E = 0.5)
	Na _{0,986} (Al _{1,005} Si _{2,995} O ₈)	000-83-1466	Albita	8.3 % (D.E = 0.3)
	K Al ₂ (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂	000-07-0025	Moscovita	8.5 % (D.E = 0.4)
	Ca (OH) ₂	000-44-1481	Portlandita	6.8 % (D.E = 0.2)
	Ca ₆ (Al (OH) ₆) ₂ (SO ₄) ₃ (H ₂ O) ₂₆	000-41-1451	Ettringita	3.4 % (D.E = 0.2)
	Ca SO ₄ (H ₂ O) ₂	000-76-1746	Yeso	4.2 % (D.E = 0.2)
	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	000-83-0971	Caolinita	6.4 % (D.E = 0.3)
	Mg ₆ Fe ₂ (OH) ₁₆ (CO ₃) (H ₂ O) ₄	000-86-0182	Plogrenita	0.6 % (D.E = 0.1)
	CaMg(CO ₃) ₂	000-36-0426	Dolomita	3.7 % (D.E = 0.3)
	Ca ₂ Si O ₄	000-33-0302	Larnita	5.8 % (D.E = 0.3)
	K Al Si ₂ O ₈	000-71-1540	Ortoclasa	10.4 % (D.E = 0.5)
Total Cristalino				89.4 %
Amorfos y otros				10.6 %

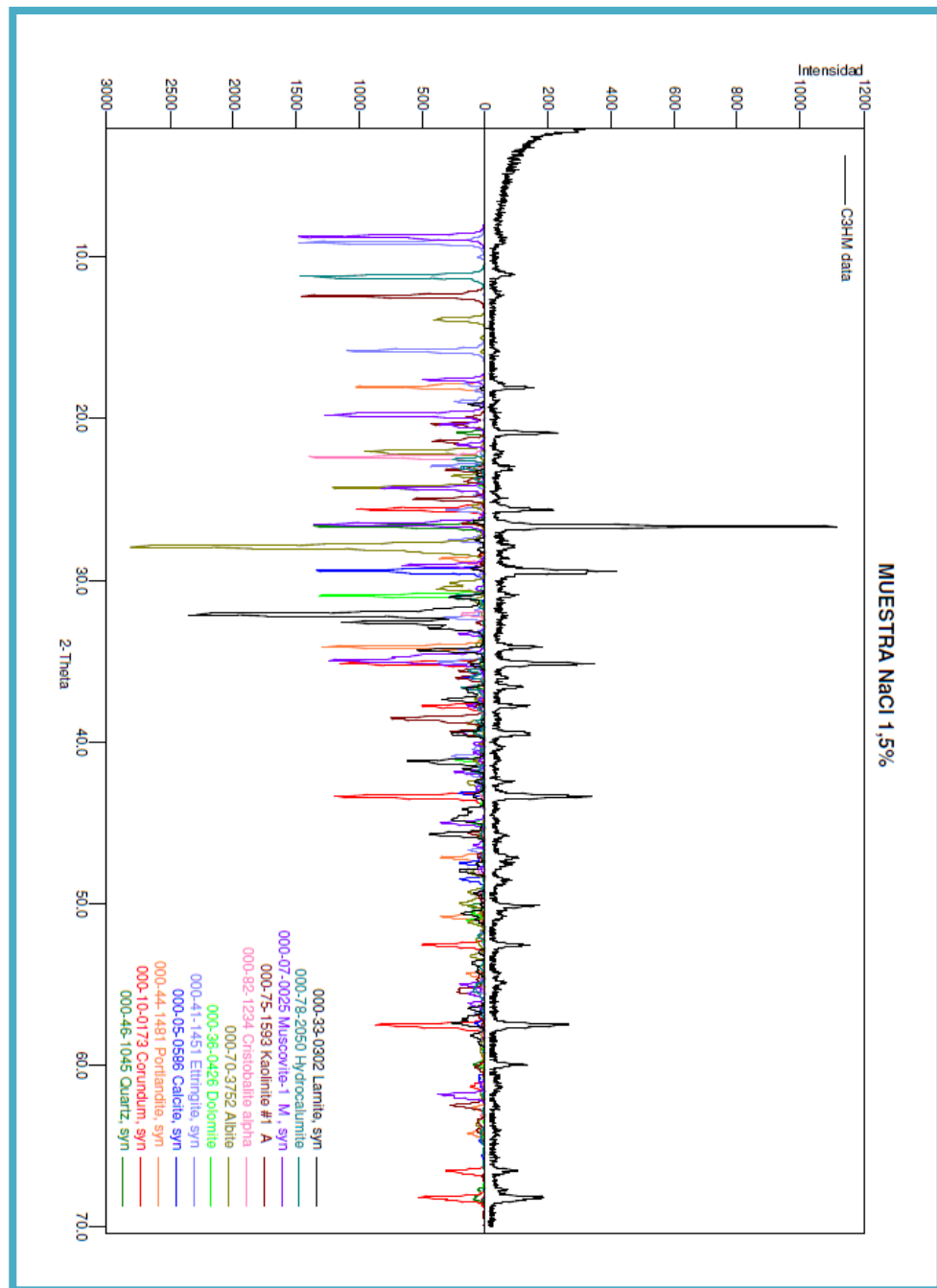
Fuente. Laboratorio de Difracción de Rayos X. Universidad Industrial de Santander.

Figura 1. Espectro de Difracción de Rayos X a muestra de concreto con porcentaje de NaCl igual a 0,0% (C3HL)



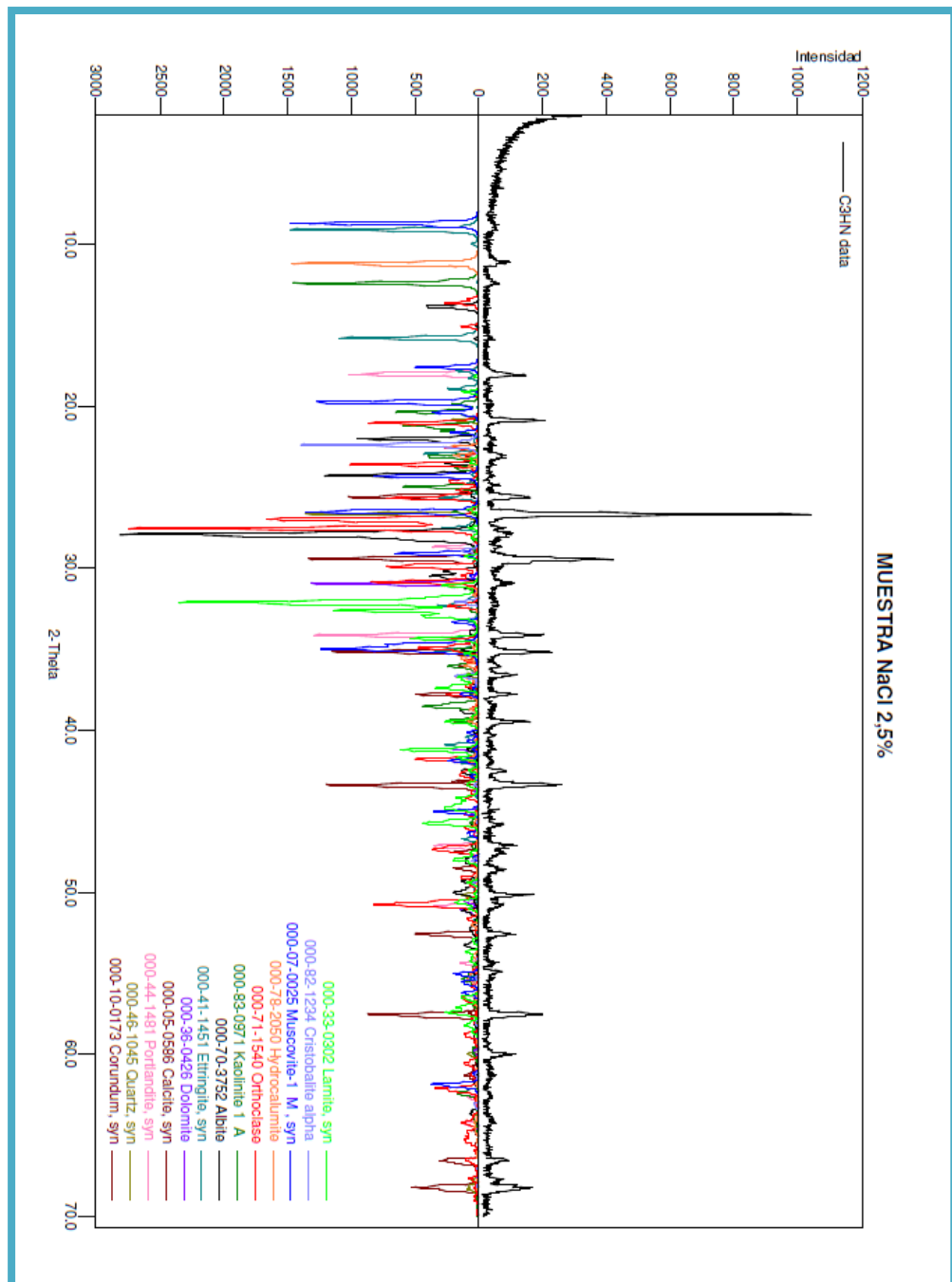
Fuente. Laboratorio de Difracción de Rayos X. Universidad Industrial de Santander.

Figura 2. Espectro de Difracción de Rayos X a muestra de concreto con porcentaje de NaCl igual a 1,5% (C3HM)



Fuente. Laboratorio de Difracción de Rayos X. Universidad Industrial de Santander.

Figura 3. Espectro de Difracción de Rayos X a muestra de concreto con porcentaje de NaCl igual a 2,5% (C3HN)



Fuente. Laboratorio de Difracción de Rayos X. Universidad Industrial de Santander.

ANEXO C: Resultado del Análisis de Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X de Energía Dispersiva

La metodología utilizada para el análisis por fluorescencia de rayos X, fue la descrita en la Tabla 1:

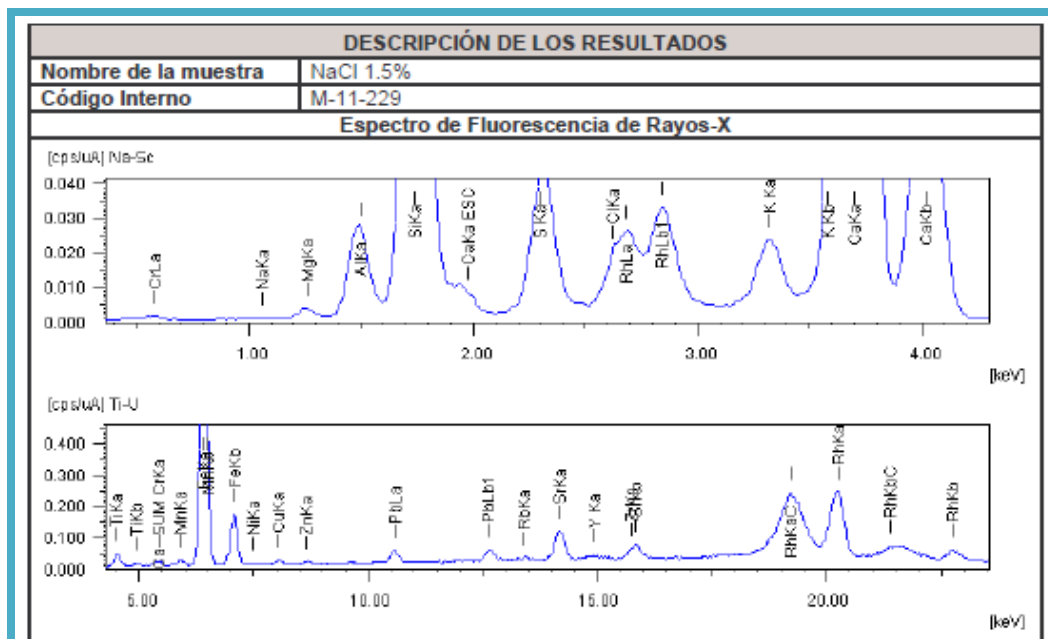
Tabla 1. Metodología del ensayo

INFORMACIÓN DE LA(S) MUESTRA(S)			
Tipo de muestra	Óxidos / Minerales	Código Externo	Código Interno
		NaCl 1.5%	M-11-229
		NaCl 2.5%	M-11-230
RMC No.	11-078	Fecha Recepción: 10 de octubre de 2011	
Condición ambiental:	22.6 °C; 51%	Fecha Toma de Datos: 12 de octubre de 2011	
Las muestras están identificadas con el mismo nombre en que fueron identificadas por el cliente, al cual se le asignó un consecutivo correspondiente a la identificación interna dada por el Laboratorio de Fluorescencia de Rayos-X del C.D.P. de Joyería.			
METODOLOGIA UTILIZADA			
Técnica de análisis: Espectrometría de Fluorescencia de Rayos-X de Energía Dispersiva. Método de ensayo: Parámetros Fundamentales			
EQUIPOS UTILIZADOS			
<i>Instrumentos y equipos:</i> Espectrómetro de Fluorescencia de Rayos-X de Energía Dispersiva <i>Shimadzu EDX-800HS</i> . Detector: Estado sólido Si (Li). Fuente de Rayos-X: Tubo de Rodio Colimador: 3 mm Filtro: Ninguno. Software: La cuantificación de los elementos se realizó empleando el método de los Parámetros Fundamentales (FP) mediante el software DXP-700E Versión 1.00 Rel. 014.			
OBSERVACIONES			
<ul style="list-style-type: none"> • El porcentaje que se asigna corresponde al 100% de los elementos detectados por la técnica de Fluorescencia de Rayos-X comprendidos desde Na hasta U. • Estos resultados se relacionan únicamente con las muestras analizadas. 			

Fuente: Laboratorio de Fluorescencia de Rayos-X del C.D.P. de Joyería.

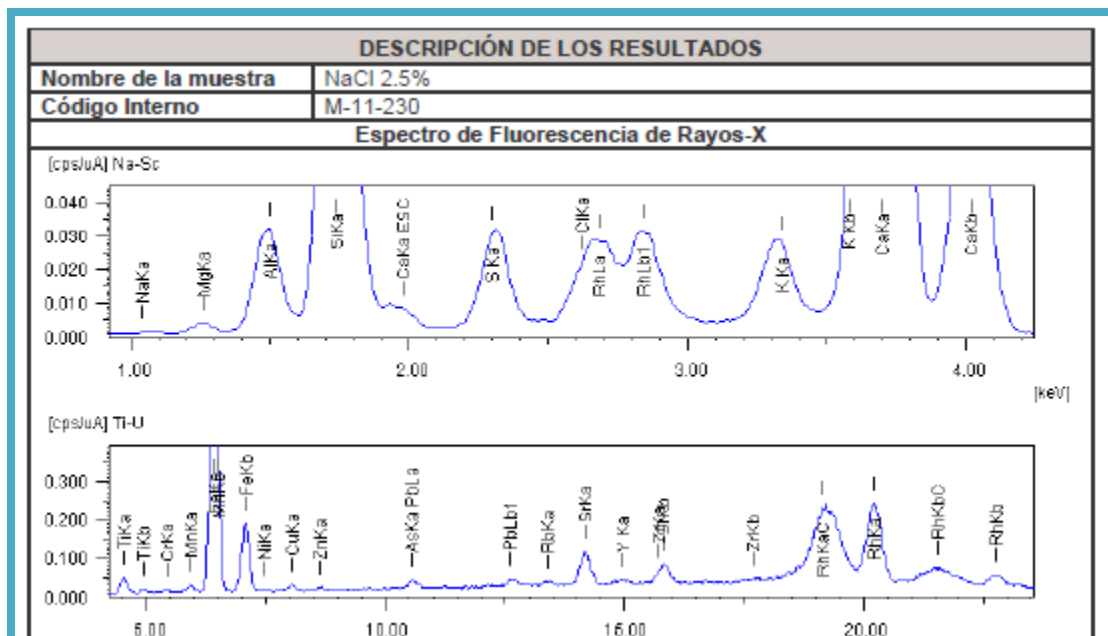
Los resultados obtenidos para las 2 muestras de concreto con 1,5% y 2,5% de NaCl se describen a continuación:

Tabla 2. Espectro de Fluorescencia para muestra con 1,5% NaCl



Fuente: Laboratorio de Fluorescencia de Rayos-X del C.D.P. de Joyería.

Tabla 3. Resultados de Fluorescencia para muestra con 2,5% NaCl



Fuente: Laboratorio de Fluorescencia de Rayos-X del C.D.P. de Joyería.

ANEXO D. Tablas de medición de tiempos de vuelo y longitudes promedio para probetas cúbicas y cilíndricas

Para las diferentes lecturas de tiempo de vuelo, se tomaron 2 mediciones por cada punto seleccionado (para encontrar un valor promedio), siendo entonces un total de 6 lecturas por probeta cilíndrica y 96 lecturas por probeta cúbica.

Los tiempos de vuelo se expresan en unidades de μs . Los valores promedio fueron resaltados a la derecha inmediata de las 2 lecturas de cada punto. Las lecturas se tabularon en valores promedio.

Tabla 1. Tiempos de vuelo para la probeta 1 a los 7 y 28 días (0,0%).

A (Tiempo de vuelo en μs)											
60	60,6	60,3	61,5	60,5	61	61,7	61,9	61,8	61,3	60,7	61
60,3	61,3	60,8	60,8	60,9	60,85	61,2	60,5	60,85	60,1	60	60,05
60,1	60,2	60,15	60,9	60,5	60,7	60,7	61,5	61,1	59,8	60,4	60,1
56,4	56,8	56,6	58,6	58,6	58,6	59,1	59,4	59,25	57,8	57,2	57,5

B (Tiempo de vuelo en μs)											
60,6	60,5	60,55	61,6	62,2	61,9	62	60,8	61,4	60,6	60	60,3
61,8	60,2	61	62,5	60,2	61,35	60,5	60,3	60,4	59,7	61,7	60,7
60,1	59,6	59,85	59,7	59,6	59,65	59,1	59,8	59,45	58,7	57,8	58,25
57,6	56	56,8	58,5	58,3	58,4	57,8	58,2	58	56,6	55,4	56

C (Tiempo de vuelo en μs)											
59,9	59,3	59,6	61,6	60,7	61,15	60,8	59,7	60,25	59,9	59,2	59,55
60,3	59,9	60,1	60,4	61	60,7	60,1	60	60,05	61	60,1	60,55
59,7	59,6	59,65	60,9	60,1	60,5	60,3	59,9	60,1	60,2	59,7	59,95
60,3	60,2	60,25	62,7	61,4	62,05	60,4	60	60,2	58,8	57,7	58,25

A (Tiempo de vuelo en μs)											
55	56	55,5	56	55,5	55,75	55	54,7	54,85	55,4	55,1	55,25
56,2	55,3	55,75	54,9	54,7	54,8	54,5	54,3	54,4	55	54,4	54,7
55,4	54	54,7	54,9	54,4	54,65	55,2	54,9	55,05	54,6	54,5	54,55
53,1	53,7	53,4	53,3	52,3	52,8	52,8	52,2	52,5	54,7	51,6	53,15

B (Tiempo de vuelo en μs)											
55,6	54,9	55,25	55,3	54,3	54,8	55,5	55,9	55,7	54,9	54	54,45
55,6	54,5	55,05	55,4	54,7	55,05	54,9	54,3	54,6	54,1	54,5	54,3
54,7	54	54,35	54,6	54,6	54,6	53,7	54,9	54,3	53,6	53	53,3
52,1	51,2	51,65	53,8	53,2	53,5	51,6	51,1	51,35	51,5	50,8	51,15

C (Tiempo de vuelo en μs)											
54,8	54,2	54,5	55,2	54,3	54,75	54,9	54,3	54,6	54,7	53,5	54,1
55,4	54,8	55,1	54,3	54,2	54,25	55,4	54,4	54,9	55,2	55,1	55,15
56	55	55,5	54,8	54,3	54,55	54,3	54,2	54,25	56,2	56,3	56,25
54,4	54,4	54,4	56,1	56	56,05	54,5	55	54,75	55	54,7	54,85

Fuente: Los autores.

Tabla 2. Tiempos de vuelo para la probeta 1 a los 7 y 28 días (2,5%).

A (Tiempo de vuelo en μs)											
53,3	54	53,65	55,3	55,4	55,35	55,4	55,2	55,3	56,9	57,1	57
54,3	55,9	55,1	54,5	55,2	54,85	54,7	55,1	54,9	55,4	55,4	55,4
55,3	55,6	55,45	55,3	55,4	55,35	55,7	55,7	55,7	56,5	56	56,25
56,1	54,4	55,25	56,5	55,8	56,15	55,4	56,1	55,75	55,3	56,5	55,9

B (Tiempo de vuelo en μs)											
55,6	54,5	55,05	56,2	55,2	55,7	56	56,1	56,05	57,9	57,9	57,9
55,1	55,2	55,15	55,1	54,8	54,95	55,1	54,7	54,9	56,6	55,3	55,95
55,9	55,4	55,65	55,6	54,8	55,2	56,4	54,3	55,35	55,9	55,1	55,5
54,6	55,1	54,85	53,8	53,6	53,7	52,9	52,3	52,6	53,6	52,9	53,25

C (Tiempo de vuelo en μs)											
57,9	57,3	57,6	59,4	58,9	59,15	59,5	59,3	59,4	59,8	61,6	60,7
57,5	57,7	57,6	56,9	58,3	57,6	58,4	57,7	58,05	56,1	56,6	56,35
56,3	57,1	56,7	57	57,3	57,15	55,6	55,2	55,4	56,2	56,2	56,2
54,8	52	53,4	54,9	53,1	54	54,4	51,9	53,15	53,3	52,6	52,95

A (Tiempo de vuelo en μs)											
52,8	51,4	52,1	54,8	52,4	53,6	53,5	52,5	53	53,3	52,1	52,7
52	52,1	52,05	52,4	51,4	51,9	54,2	53,2	53,7	52,6	52,2	52,4
53,1	53,9	53,5	53	54,2	53,6	53,3	52,9	53,1	52,4	52,1	52,25
53,9	52,8	53,35	54,6	54,3	54,45	54,5	53,8	54,15	54,3	53,7	54

B (Tiempo de vuelo en μs)											
54,5	54,8	54,65	55,3	54,3	54,8	54,8	54,2	54,5	55,9	55,8	55,85
55,1	54,9	55	54,1	53,5	53,8	53,3	53,6	53,45	54,6	54,3	54,45
54,2	53,6	53,9	53,2	52,8	53	52,7	52,7	52,7	54,7	55,6	55,15
51,9	51,9	51,9	53,1	51,9	52,5	52	52,4	52,2	51,4	52,1	51,75

C (Tiempo de vuelo en μs)											
55,8	56	55,9	54,5	54,7	54,6	55,1	55,2	55,15	54,9	55,8	55,35
56	54,3	55,15	54,7	54,4	54,55	53,6	55,1	54,35	54,5	55	54,75
54,6	53,3	53,95	54,2	54,2	54,2	54,5	54,5	54,5	55,4	53,7	54,55
54	52	53	54,1	54,7	54,4	53,9	53,3	53,6	52	52,2	52,1

Fuente: Los autores.

Tabla 3. Tiempos de vuelo promedio para las probetas cilíndricas a los 28 días.

0.0%	ARRIBA	FRENTE	ATRÁS	Tv PROMEDIO
A	65,55	67,25	65,7	66,16666667
B	65,1	65	64,65	64,91666667
C	65,4	65,5	65,58	65,49333333
D	63,55	64,3	64,35	64,06666667

0.8%	ARRIBA	FRENTE	ATRÁS	Tv PROMEDIO
A	61,8	61,55	59,65	61
B	59,8	59,65	58,3	59,25
C	58,55	58,95	59,25	58,91666667
D	57,45	57,15	58,3	57,63333333

1.5%	ARRIBA	FRENTE	ATRÁS	Tv PROMEDIO
A	56,2	57,15	57	56,78333333
B	57,5	56,95	56,25	56,9
C	56,3	57,2	56,45	56,65
D	57,35	56,45	57,5	57,1

2.5%	ARRIBA	FRENTE	ATRÁS	Tv PROMEDIO
A	56,8	56,3	56,4	56,5
B	56,1	57,05	56,15	56,43333333
C	56,8	57,55	56,85	57,06666667
D	56,4	56,3	55,8	56,16666667

Fuente: Los autores.

Tabla 24. Longitudes promedio de las probetas cilíndricas.

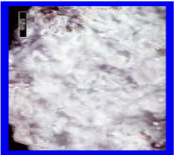
0.0%	LONGITUD	DIAMETRO
A	208,61	103,68
B	208,08	103,35
C	207,55	103,98
D	207,84	103,22
Prom	208,02	
0.8%	LONGITUD	DIAMETRO
A	209,23	103,51
B	208,96	104,43
C	209,31	103,26
D	208,88	103,39
Prom	209,095	
1.5%	LONGITUD	DIAMETRO
A	208,1	104
B	208,41	103,87
C	207,96	103,1
D	208,27	103,94
Prom	208,185	
2.5%	LONGITUD	DIAMETRO
A	208,64	103,35
B	209,4	103,82
C	207,48	103,44
D	208,42	103,55
Prom	208,485	

Fuente: Los autores.

Anexo E. Ficha Técnica del compuesto químico Hidrocalumita

La hidrocalumita es un compuesto químico de tipo arcilloso que se forma cuando a la mezcla de concreto se adiciona NaCl. Para esta investigación, presentamos a continuación la ficha técnica de la hidrocalumita.

Tabla 1. Información general e imagen de la hidrocalumita.

General Hydrocalumite Information																																
Chemical Formula:	Ca ₂ Al(OH)6Cl _{1-x} (OH) _x ·3(H ₂ O)																															
Composition:	Molecular Weight = 289.46 gm																															
	<table border="1"> <tr> <td>Calcium</td> <td>27.69 %</td> <td>Ca</td> <td>38.75 %</td> <td>CaO</td> </tr> <tr> <td>Aluminum</td> <td>9.32 %</td> <td>Al</td> <td>17.61 %</td> <td>Al₂O₃</td> </tr> <tr> <td>Hydrogen</td> <td>4.35 %</td> <td>H</td> <td>38.90 %</td> <td>H₂O</td> </tr> <tr> <td>Chlorine</td> <td>6.12 %</td> <td>Cl</td> <td>6.12 %</td> <td>Cl</td> </tr> <tr> <td></td> <td>-</td> <td>%</td> <td>Cl</td> <td>-1.38 %</td> <td>-O=Cl₂</td> </tr> <tr> <td>Oxygen</td> <td>52.51 %</td> <td>O</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	Calcium	27.69 %	Ca	38.75 %	CaO	Aluminum	9.32 %	Al	17.61 %	Al ₂ O ₃	Hydrogen	4.35 %	H	38.90 %	H ₂ O	Chlorine	6.12 %	Cl	6.12 %	Cl		-	%	Cl	-1.38 %	-O=Cl ₂	Oxygen	52.51 %	O		
Calcium	27.69 %	Ca	38.75 %	CaO																												
Aluminum	9.32 %	Al	17.61 %	Al ₂ O ₃																												
Hydrogen	4.35 %	H	38.90 %	H ₂ O																												
Chlorine	6.12 %	Cl	6.12 %	Cl																												
	-	%	Cl	-1.38 %	-O=Cl ₂																											
Oxygen	52.51 %	O																														
Empirical Formula:	Ca ₂ Al(OH) ₆ Cl _{0.5} ·3(H ₂ O)																															
Environment:	Late-stage hydrothermal mineral in skarns formed from contact metamorphism of limestone																															
IMA Status:	Valid Species (Pre-IMA) 1934																															
Locality:	Scawt Hill, near Lame, Co. Antrim, Ireland. Link to Mindat.org location Data.																															
Name Origin:	Named for a HYDROUS mineral containing Calcium and ALUMinum.																															
Name Pronunciation:	Hydrocalumite + Pronunciation <input type="text"/>																															
Synonym:	ICSD 63250 PDF 31-245																															
Hydrocalumite Image																																
Images:	 <p>Hydrocalumite</p> <p>Comments: Bright white platy crystal aggregate of hydrocalumite. Location: Boissejour, Puy-de-Dome, France. Scale: See Photo. @JeffWeissman / Photographic Guide to Mineral Species</p>																															

Fuente: <http://webmineral.com/data/Hydrocalumite.shtml>

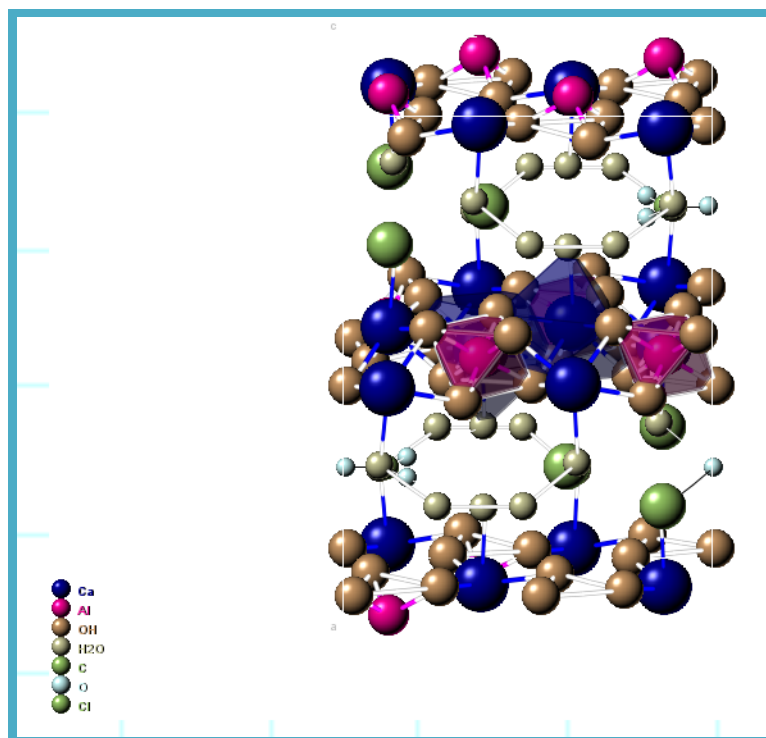
Tabla 2. Estructura cristalina y propiedades físicas de la hidrocalumita.

Hydrocalumite Crystallography	
■ Axial Ratios:	a:b:c = 0.8421:1:1.4771
■ Cell Dimensions:	a = 9.6, b = 11.4, c = 16.84, Z = 8; beta = 111° V = 1,720.56 Den(Calc) = 2.23
■ Crystal System:	Monoclinic - Sphenoidal H-M Symbol (2) Space Group: P 2 ₁
■ X Ray Diffraction:	By Intensity(I/I ₀): 7.86(1) , 3.93(0.6) , 2.89(0.5)
Physical Properties of Hydrocalumite	
■ Cleavage:	{001} Perfect
■ Color:	Colorless, Light green.
■ Density:	2.15
■ Diaphaneity:	Transparent
■ Hardness:	3 - Calcite
■ Luster:	Vitreous - Pearly
■ Streak:	white

Fuente: <http://webmineral.com/data/Hydrocalumite.shtml>

A continuación, se presenta la estructura cristalina en una imagen 3D donde se puede apreciar los diferentes elementos que la componen y su sistema cristalino.

Figura 1. Estructura cristalina de la hidrocalumita



Fuente: <http://webmineral.com/data/Hydrocalumite.shtml>

Tabla 3. Propiedades ópticas, propiedades calculadas y clasificación de la hidrocalumita.

Optical Properties of Hydrocalumite	
Gladstone-Dale:	$C_{\text{meas}} = 0.053$ (Good) - where the $C_i = (1 - K_{\text{Fmeas}}/K_c)$ $C_{\text{calc}} = 0.087$ (Poor) - where the $C_i = (1 - K_{\text{Fcalc}}/K_c)$ $K_{\text{Fcalc}} = 0.2459$ $K_{\text{Fmeas}} = 0.255$ $K_c = 0.2894$ $N_{\text{calc}} = 1.58 - 1.6$ Biaxial (-), $a = 1.535$, $b = 1.553$, $g = 1.557$, $\text{bire} = 0.0220$, $2V(\text{Calc}) = 50$, $2V(\text{Meas}) = 24$.
Optical Data:	
Calculated Properties of Hydrocalumite	
Electron Density:	Bulk Density (Electron Density)=2.23 gm/cc note: Specific Gravity of Hydrocalumite =2.15 gm/cc.
Fermion Index:	Fermion Index = 0.0006324168
Photoelectric:	Boson Index = 0.9993675832 PE Hydrocalumite = 4.05 barns/electron
Radioactivity:	U=PE Hydrocalumite x Electron Density= 9.02 barns/cc. GRapi = 0 (Gamma Ray American Petroleum Institute Units) Hydrocalumite is Not Radioactive
Hydrocalumite Classification	
Dana Class:	06.04.04.01 (06) Hydroxides and Oxides Containing Hydroxyl (06.04) containing multiple cations (06.04.04) Dana Group <small>06.04.04.01 Hydrocalumite Ca2Al(OH)Cl1-4(OH)3-3(H2O) P.2, 2</small>
Strunz Class:	04.FL.10.04. OXIDES (Hydroxides, V,5,6) vanadates, arsenites, antimonites, bismuthites, sulfites, selenites, tellurites, iodate 04.FL. -Hydroxides (without V or U) 04.FL. -Hydroxides with H2O ± (OH): sheets of edge-sharing octahedra <small>04.FL.10 Hydrocalumite Ca2Al(OH)Cl1-4(OH)3-3(H2O) P.2, 2</small>

Fuente: <http://webmineral.com/data/Hydrocalumite.shtml>

Anexo F. Ficha Técnica de la sal REFISAL ALTA PUREZA

La sal utilizada para los porcentajes de cloruro que se adicionaron en las diferentes mezclas fue REFISAL ALTA PUREZA, perteneciente a Brinsa S.A.

Tabla 1. Ficha técnica SAL ALTA PUREZA REFISAL (Parte 2)

USOS E INSTRUCCIONES	<p>El principal uso de la sal purificada, refinada, yodada y fluorizada para consumo humano esta en la alimentación diaria porque permite resaltar el verdadero sabor de las comidas. Adicionalmente, las estrictas cantidades de yodo y flúor agregadas al producto contribuyen significativamente a la prevención de enfermedades como el bocio, el cretinismo, retardo mental severo y la caries dental, especialmente en los niños.</p> <p>Industrialmente se utiliza en: alimentos para fabricación de conservas, sopas Instantáneas, procesamiento y conservación de pescado y carnes en general; procesamiento de derivados lácteos, panadería y pastelería. Químicos para fabricación de cloro líquido, soda caústica, soda ash (carbonato de sodio), sulfato, cianuro y clorato de sodio, separación de glicerina en los procesos de fabricación de jabones y detergentes. Curtiembres para prevención de la descomposición bacterial del cuero (curado de pieles). Textiles para estandarización de la intensidad del tinte y fijación del color en las fibras textiles. Cerámica para vitrificación de superficies. Ganadería como portador ideal de minerales y elementos trazados en la dieta animal. Tratamiento de Agua para regeneración de resinas de intercambio iónico. Otros usos: componente de lodos de perforación utilizados para la extracción de petróleo, obtención del caucho a partir de látex, manufactura de pulpa y papel. La sal purificada, refinada yodada y fluorizada para consumo humano producida por Brinsa es un condimento necesario en la dieta alimentaria.</p>
CONDICIONES DE ALMACENAMIENTO	<p>La sal purificada, refinada, yodada y fluorizada para consumo humano producida por Brinsa, se almacena sobre estibas en una bodega cubierta y seca, alejada de cualquier foco de contaminación e insalubridad; protegida del ambiente exterior por medio de paredes hechas en láminas de PVC. El lugar deberá estar destinado solamente al almacenamiento de sal procesada.</p>
MANEJO Y TRANSPORTE	<p>La manipulación del producto en cargue, transvase, descargue, disolución, mezcla y toma de muestra no presenta riesgo. Es conveniente el uso de protección respiratoria cuando se presente formación de polvo en gran cantidad. Los vehículos utilizados para el transporte de sal refinada deberán tener el piso bien barrido y limpios los parales y barandas. Además estarán dotados de carpas para proteger bien la carga de la lluvia y el polvo durante el viaje. No se deben cargar con sal producida por Brinsa vehículos que en el último viaje hayan transportado harina de pescado, ganado, jabones, cueros insecticidas, herbicidas o derivados del petróleo u otro producto que genere olores persistentes, pues la mercancía absorbe el olor desagradable deteriorándose el sabor y la buena calidad de la sal refinada producida por Brinsa.</p>
PRECAUCIONES Y RESTRICCIONES	<p>El uso final del producto es de responsabilidad absoluta y aceptada por el cliente. La información se ha consignado a título ilustrativo y no sustituye las patentes o licencias sobre el uso del producto. EVITE FALSIFICACIONES. Destruya el material de empaque cuando termine su contenido.</p>
	<p>ATENCION DE EMERGENCIAS. Tel: (57 1) 8522566 - 484 6000 Ext. 444. Planta Betania: km. 6 vía Cajicá - Zipaquirá Tels: (+1) 852 2566 - 484 6000 Fax: (+1) 852 3646 Planta Mamonal: km. 11 vía Mamonal - Cartagena Tel: (+5) 668 6212 Fax: (+5) 668 6206 Ext. 1721 Oficina Bogotá Tel: (+1) 635 6080 Fax (+1) 636 1961 Oficina Medellín Tel: (+4) 313 7575 Fax: (+4) 313 9764 Brinsa S.A. Nit: 800-221-789-2 A.A. 3005 Bogotá, D.C. Colombia - Sur América</p>

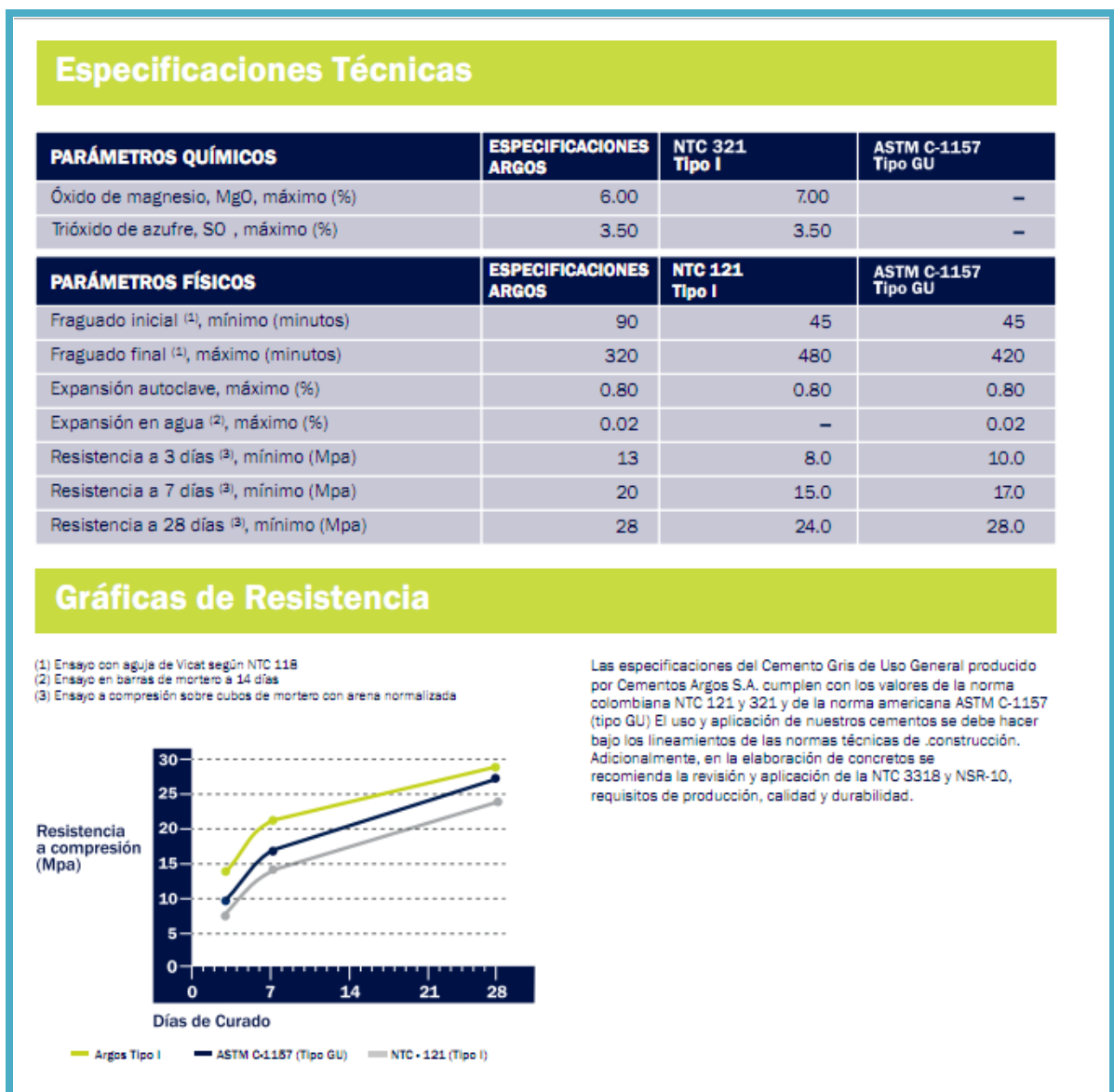
Fuente: BRINSA S.A. sitio web:

<http://www.refisal.com.co/pages/productos/sabor/usuario/pdf/Alta%20pureza.pdf>

Anexo G. Ficha Técnica Especificaciones Técnicas del Cemento ARGOS Portland Tipo I

El cemento utilizado en la investigación marca ARGOS Portland Tipo I, posee las siguientes especificaciones técnicas:

Tabla 1. Ficha Técnica Especificaciones Técnicas del Cemento ARGOS Portland Tipo I



Fuente: ARGOS S.A. sitio web: <http://www.argos.co/site/Default.aspx?tabid=88>