

USO DE ARCILLA ACTIVADA PROCEDENTE DE NEMOCÓN SECTOR PAJARITO, USADA COMO ADICIÓN MINERAL FUNCIONAL PARA UN CONCRETO COMÚN DE 21 MPA. EN PORCENTAJES ENTRE EL 5% Y 10%.

Jhojan Sebastian Robles Fontecha, Jorge Camilo Carvajal Bautista, Oscar Andres Piamonte Cruz



Ingeniería Civil, Facultad de Ingenierías

Universidad La Gran Colombia

Bogotá

2024

Uso de Arcilla activada procedente de Nemocón sector pajarito, usada como adición mineral funcional para un concreto común de 21 MPa. En porcentajes entre el 5% y 10%.

Jhojan Sebastian Robles Fontecha, Jorge Camilo Carvajal Bautista, Oscar Andres Piamonte Cruz

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Civil

Miguel Antonio Caro Payares “Director”



Ingeniería Civil, Facultad de Ingenierías

Universidad La Gran Colombia

Bogotá

2024

Tabla de contenido

Resumen	10
Abstract.....	11
Introducción.....	12
1. Planteamiento del problema	14
2. Justificación.....	15
3. Objetivos	16
3.1 Objetivo General.....	16
3.2 Objetivos Específicos.....	16
4. Marco Teórico	17
4.1 Materiales para la elaboración de concreto	17
4.2 Explotación, producción y molienda de Arcilla Activada	18
4.2.1 Arcilla	18
4.2.2 Clasificación de las arcillas	18
4.2.3 Características de las arcillas activadas.....	19
4.2.4 Explotación de la arcilla	20
4.2.5 Producción de arcilla Activada	21
4.3 Diseño de Mezcla	23
4.4 Fundamentos del concreto	25
4.5 Fundamentos de las adiciones del concreto.....	29
5. Metodología.....	32

5.1	Molienda y Caracterización Arcilla activada	32
5.2	Propiedades y características cemento ART	34
5.3	Caracterización agregado grueso y fino.....	36
5.4	Diseño de mezclas de concreto planta Puente Aranda – Bogotá (HOLCIM)	38
5.5	Procedimiento de mezcla concreto patrón	40
5.6	Procedimiento de mezcla concreto con 5% adición de Arcilla Activada	41
5.7	Procedimiento de mezcla concreto con 10% adición de Arcilla Activada	42
5.8	Procedimiento de pruebas de concreto en estado fresco.....	43
5.8.1	Asentamiento.....	43
5.8.2	Temperatura	44
5.8.3	Contenido de aire.....	44
5.8.4	Exudación visual.....	45
5.9	Procedimiento de pruebas de concreto en estado endurecido	45
5.9.1	Resistencia a la compresión.....	45
6.	Resultados procedimiento concreto patrón	47
6.1	Resultados en estado fresco	47
6.2	Resultados en estado endurecido.....	48
7.	Resultados procedimiento con 5% adición de Arcilla Activada	49
7.1	Resultados en estado fresco	49
7.2	Resultados en estado endurecido.....	51
8.	Resultados procedimiento con 10% adición de Arcilla Activada	51
8.1	Resultados en estado fresco	51

8.2	Resultados en estado endurecido.....	53
9.	Análisis comparativo de resultados	53
	Conclusiones y Recomendaciones	60
	Lista de Referencia o Bibliografía.....	61
	Anexos.....	65

Lista de Figuras

Figura 1 Análisis termogravimétrico de las arcillas.....	20
Figura 2 Análisis termogravimétrico de las arcillas.....	21
Figura 3 Transporte de arcilla cruda	21
Figura 4 Extrusión de arcilla cruda para la elaboración del ladrillo	22
Figura 5 Secado de los ladrillos	22
Figura 6 Calcinación de los bloques a una temperatura de 650°C en un horno Hoffman	23
Figura 7 Variaciones de las proporciones usadas en una mezcla de concreto en volumen absoluto	26
Figura 8 Molino de bolas con carga abrasiva para moler a finura de 8%.....	33
Figura 9 Evolución de resistencia a la compresión cemento ART.....	35
Figura 10 Curva granulométrica agregado grueso.....	37
Figura 11 Curva granulométrica agregado fino	38
Figura 12 Estadística concreto común 21 MPa planta puente Aranda.....	39
Figura 13 Contenido de cemento mezcla testigo	41
Figura 14 Contenido de arcilla activada 5% de adición	42
Figura 15 Contenido de arcilla activada 10% de adición	43
Figura 16 Cilindros de concreto después de 30 minutos para la prueba de exudación visual.....	45
Figura 17 Asentamiento de salida concreto testigo	47
Figura 18 Contenido de aire concreto testigo	48

Figura 19 Desempeño de resistencia concreto testigo.....	49
Figura 20 Asentamiento de salida concreto con 5% de arcilla activada.....	50
Figura 21 Contenido de aire concreto con 5% de arcilla activada	50
Figura 22 Desempeño resistencias a la compresión concreto con 5% de arcilla activada	51
Figura 23 Asentamiento de salida concreto con 10% de arcilla activada.....	52
Figura 24 Contenido de aire concreto con 10% de arcilla activada.....	52
Figura 25 Desempeño de resistencias a la compresión concreto con 10% de arcilla activada	53
Figura 26 Muestras de concreto después de su periodo de curado	54
Figura 27 Desempeño comparativo contenidos de aire.....	55
Figura 28 Desempeño comparativo de resistencias a la compresión	56
Figura 29 Porcentaje óptimo de adición de arcilla activada	57

Lista de Tablas

Tabla 1. Clasificación de las arcillas.	18
Tabla 2.Composición mineralógica arcilla activada DRX.	33
Tabla 3.Compuestos de la arcilla activada FRX.	34
Tabla 4.Especificación por desempeño NTC 121.	34
Tabla 5.Desempeño cemento tipo ART Industrial HOLCIM.	35
Tabla 6.Granulometría agregado grueso procedencia Mondoñedo.	36
Tabla 7.Granulometría agregado fino procedencia rio Guayuriba	37
Tabla 8.Caracterización de agregados para la mezcla de concreto.	38
Tabla 9.Diseño de concreto planta Puente Aranda HOLCIM.	39
Tabla 10. Procedimiento mezcla concreto testigo.	40
Tabla 11.Procedimiento mezcla concreto con 5% de arcilla activada	41
Tabla 12.Procedimiento mezcla concreto con 10% de arcilla activada.	42
Tabla 13.Conformación de especímenes de concreto y edades de falla.....	46
Tabla 14.Tolerancias de ensayo de resistencia a la compresión.	46
Tabla 15.Resultados en estado fresco concreto testigo.	47
Tabla 16.Resultados en estado endurecido concreto patrón.....	48
Tabla 17.Resultados en estado fresco concreto con 5% de arcilla activada.	49
Tabla 18.Resultados en estado endurecido con 5% de arcilla activada.	51
Tabla 19.Resultados en estado fresco concreto con 10% de arcilla activada.	51

Tabla 20.Resultados en estado endurecido con 10% de arcilla activada.	53
Tabla 21.Resultados comparativos en estado endurecido.	55
Tabla 22.Análisis económico concreto testigo, 5% y 10% de arcilla activada.	58
Tabla 23.Análisis económico concreto testigo y porcentaje óptimo de adición.	58

Resumen

El presente trabajo de grado tiene como objetivo desarrollar un concreto de 21 MPa con arcilla activada proveniente de Nemocon sector pajarito, evaluando dos porcentajes diferentes de adición de arcilla activada, tomando un diseño de la planta de HOLCIM Puente Aranda y replicándolo en el laboratorio mediante las normas y procedimientos establecidos en las normas técnicas colombianas y la NSR-10 en su título C, con el fin de determinar el porcentaje óptimo de inclusión dentro de una mezcla de concreto sin que este pierda sus propiedades.

Una vez obtenido el porcentaje óptimo de adición mineral, se procede a realizar un análisis técnico-económico para establecer la viabilidad tanto técnica como económica del proyecto de grado y su influencia dentro de la industria de la producción de concreto y los beneficios que este tipo de adición otorga.

Palabras clave: Concreto, Adición mineral, Arcilla activada, normas técnicas, diseño de mezcla.

Abstract

The objective of this degree work is to develop a concrete of 21 MPa with activated clay from Nemocon pajarito sector, evaluating two different percentages of added activated clay, taking a design from the HOLCIM Puente Aranda plant and replicating it in the laboratory through the standards and procedures established in the Colombian technical standards and the NSR-10 in its title C. in order to determine the optimal percentage of inclusion within a concrete mix without losing its properties.

Once the optimal percentage of mineral addition has been obtained, a technical-economic analysis is carried out to establish the technical and economic viability of the grade project and its influence within the concrete production industry and the benefits that this type of addition provides.

Keywords: Concrete, Mineral Addition, Activated Clay, Technical Standards, Mix Design.

Introducción

Los materiales cementantes complementarios MCS, son materiales de origen natural que de forma artificial o bajo procesos geológicos, tienen propiedades cementantes en combinación con el cemento hidráulico, esta tecnología en Colombia viene tomando fuerza en el último tiempo, ya que la presencia en el concreto de este tipo de adiciones logra aportar propiedades como la disminución del calor de hidratación, el aporte de resistencias con menores cuantías de cemento, mayor resistencia a ataques de sulfatos y de la reacción álcali-sílice, el avance en la tecnología del concreto, ha llevado a que los MCS, sean necesarios para los nuevos desafíos que se plantean. Así mismo, este tipo de adiciones minerales, tienen hasta un 70% menos de emisiones de CO₂ (DynamisUMB, 2020), esta característica ha sido también motivo para que se estudie más a fondo el uso dentro de la producción de concreto.

En Latinoamérica este tipo de adición mineral como la arcilla activada, se ha estudiado con fuerza en Perú, en donde se realizó la investigación de dos arcillas activadas de diferentes procedencia y características, tanto físicas como químicas, en donde se logra evidenciar que, aunque cada arcilla tiene temperaturas de activación diferentes, estas logran un aumento en las resistencias a la compresión con respecto a un concreto patrón.

El proceso de activación de la arcilla, consiste en someter el material a una temperatura entre los 500 °C y 1000°C en un horno tipo Hoffman, la temperatura varía según las características químicas de la arcilla, en el cual ocurre un proceso de modificación de la estructura cristalina, eliminando el agua molecular formando una adición mineral que interactúa con el cemento portland en su proceso de hidratación.

Es por esto, que esta investigación tiene como objetivo determinar el porcentaje óptimo de inclusión de adición mineral de Arcilla activada proveniente de Nemocon sector pajarito, dentro de una

mezcla de concreto de 21 MPa, con el fin de disminuir la cantidad que se usa de cemento garantizando el cumplimiento de la especificación propuesta. Una vez definido, se establecerá un procedimiento para realizar la activación de este tipo de arcilla y su uso en el concreto, con el fin de que la industria concretera incluya dentro de sus operaciones la arcilla activada.

En este sentido, la presente investigación se sustentará en un marco teórico enfocado al estudio de las características de la arcilla, el proceso y temperatura de activación para que se logre llegar a los parámetros establecidos, así mismo se abordarán temas relacionados a cada materia prima del concreto y la importancia del diseño del mismo, mediante los diferentes métodos que existen para lograrlo.

1. Planteamiento del problema

La fabricación del cemento portland, la cual es, materia prima del concreto, implica la transformación de diversos materiales compuestos de Sílice, Aluminio y óxidos de hierro, que al ser mezclados y calentados a temperaturas mayores a los 1400 °C generan reacciones químicas y por ende emisiones de gases como lo son el CO₂ y N₂.

Así mismo, los nuevos acuerdos internacionales como el que fue adoptado por 196 partes en la COP21 que se realizó en París (El Acuerdo de París, s. f.) sobre la protección al medio ambiente, obligan a que cada país adopte las medidas necesarias para disminuir la emisión de gases efecto invernadero, por tal motivo nace la necesidad de buscar materiales alternativos que su transformación no implique emisiones tan altas o buscar materiales producto de los desechos de otras industrias.

La búsqueda de materiales alternativos se basa en encontrar productos los cuales posean propiedades hidráulicas, con estructura y composición química específicas, que en estado endurecido ofrezca un aporte a las propiedades mecánicas según el diseño de concreto a evaluar, ya que, algunas concentraciones de minerales ocasionan problemas de durabilidad, reacciones adversas que hacen inviable el uso de ese material como adición cementante.

Teniendo en cuenta lo anterior, la pregunta que orientará la investigación es: **¿Cuál sería el porcentaje óptimo para evaluar la fabricación de un concreto con especificación de resistencia mecánica a la compresión de 21 Mpa con asentamiento de 5" +-1" (concreto convencional); sustituyendo el cemento por la arcilla activada de Nemocón sector pajarito con las dosis propuestas de 5% y 10%?**

2. Justificación

El sector de la construcción, más específicamente aquellas empresas que dentro de su actividad económica está la explotación y fabricación de materiales como el cemento y el concreto, implementan adiciones minerales con capacidades cementantes como lo son las arcillas activadas, puzolanas y cenizas volantes.

La investigación sobre las arcillas ubicadas en las cercanías de Bogotá es necesaria ya que la producción de concreto en Bogotá y sus zonas aledañas, alcanza un volumen de 7.500 m³ diarios, que es la producción más alta en Colombia. (DANE, 2024). Esta investigación podría aportar a la producción de concreto de Bogotá y sus alrededores, como solución a la disminución de la fabricación de materiales con menos emisiones de CO₂, teniendo en cuenta que el cemento ocupa dentro de una mezcla de concreto alrededor del 10%(Sanchez, 2001), y es el material más costoso y con más emisiones dentro de su fabricación.

Esta investigación, es novedosa en el centro del país, pues en la actualidad, las concreteras no presentan dentro de sus operaciones este tipo de adiciones funcionales, lo que generaría un impacto positivo no solo en la industria de la construcción sino también en las poblaciones cercanas a este tipo de industrias pues la calidad del aire mejoraría considerablemente con el tiempo.

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

Determinar el porcentaje óptimo de inclusión de adición mineral de Arcilla activada proveniente de Nemocon sector pajarito, dentro de una mezcla de concreto de 21 MPa, con el fin de disminuir la cantidad que se usa de cemento garantizando el cumplimiento de la especificación propuesta.

3.2 Objetivos Específicos

- Identificar las características físicas y químicas de la arcilla activada, con el fin de determinar el porcentaje de sustitución óptimo dentro de una mezcla de concreto.
- Realizar un diseño comparativo con diferentes porcentajes de inclusión de la arcilla activada y sustitución del cemento, para determinar propiedades en estado fresco y endurecido del concreto.
- Analizar la viabilidad técnica y económica de la inclusión de la arcilla activada dentro de una mezcla de concreto con las dosis propuestas de la adición mineral.

4. Marco Teórico

4.1 Materiales para la elaboración de concreto

El concreto es una mezcla el cual está compuesta por agregados, material cementante, agua, aire y en algunos de los casos se agregan aditivos siendo estos muy diferentes a los anteriormente mencionados, el cual le da propiedades especiales al concreto; así cuando se encuentra en estado plástico admite cualquier tipo de forma y en su estado endurecido resiste los esfuerzos mecánicos y es muy durable frente a las diversas acciones que se puedan presentar durante el proceso.

Material cementante: Generalmente el cemento hidráulico o material cementante, es una sustancia que al mezclarse con agua, reacciona químicamente para poder formar una masa que puede endurecerse y adquirir una resistencia el cual en su proceso de mezclado se une con otros materiales como agregados (arena, grava), para poder formar una estructura solida y duradera.

Arena: La arena es un agregado fino el cual está compuesto por partículas muy pequeñas de rocas y minerales como el cuarzo, esta es esencial en su proceso de elaboración ya que ayuda a llenar los espacios entre los agregados gruesos, proporcionando una mayor densidad al concreto y mejorando su trabajabilidad y acabado para contribuir la resistencia y estabilidad de la mezcla al final.

Grava: La grava es un material grueso que consiste en fragmentos de roca variable generalmente entre 5 mm y 38 mm de diámetro, este es un agregado clave en la mezcla del concreto pues proporciona volumen y resistencia estructural debido a que su función principal es formar el esqueleto de la mezcla para así poder distribuir las cargas de manera uniforme y contribuir a la integridad estructural del concreto.

Aditivos: Los aditivos son sustancias químicas que se añaden en algunos casos a la mezcla de concreto para modificar o mejorar sus propiedades en estado plástico o endurecido su uso permite optimizar el rendimiento del concreto para diferentes aplicaciones y condiciones ambientales.

Agua: Es un componente esencial ya que inicia la reacción química de hidratación con el cemento lo que permite que la mezcla de concreto fragüe y se endurezca formando estructuras sólidas, su cantidad en la elaboración o mezclado son cruciales para determinar las propiedades de este ya que dará mejor trabajabilidad, resistencia y durabilidad.

Aire: El aire son pequeñas burbujas de aire el cual quedan atrapadas dentro de la mezcla esta puede ser naturalmente atrapado en su proceso de elaboración o en algunos de los casos introducido intencionalmente llamado inclusores de aire.

4.2 Explotación, producción y molienda de Arcilla Activada

4.2.1 Arcilla

La Arcilla es un material de origen natural el cual está presente en gran cantidad sobre la superficie terrestre, es producto de la meteorización de los suelos y por lo general estas se encuentran en tamaños menores a las 2 μm .

4.2.2 Clasificación de las arcillas

Las arcillas se clasifican de acuerdo a su origen y estructura molecular

Tabla 1.
Clasificación de las arcillas.

Tipo de Arcilla	Formación	Composición Química	Propiedades
Arcilla Caolinitica	Rocas silicoaluminosas, meteorizadas por acción del agua y del aire.	SiO ₂ : 46.5 % Al ₂ O ₃ : 39,6 % H ₂ O: 13,9 %	Menor capacidad de absorción de agua.

Arcilla Montmorillonítica	Procedentes de rocas con presencia de silicatos aluminicos y sílice.	SiO ₂ : 48 – 56 % Al ₂ O ₃ : 11 – 22 % MgO: 0.3 - 0.8	Absorben grandes cantidades de agua, caracterizados por su aumento de volumen
Arcillas Illíticas	Procedentes de la meteorización de rocas con grandes presencias de feldespato.	SiO ₂ : 55 %, Al ₂ O ₃ : 27-29 % H ₂ O: 0.8-0.9 % K ₂ O: 0.2-0.8 %	El índice de plasticidad de los minerales de esta familia es menor que el de las montmorillonitas

Nota: Libro Caracterización de materiales arcillosos y su potencial aplicación en la industria cerámica

Los siguientes son los compuestos de mayor presencia dentro de una molécula de arcilla.

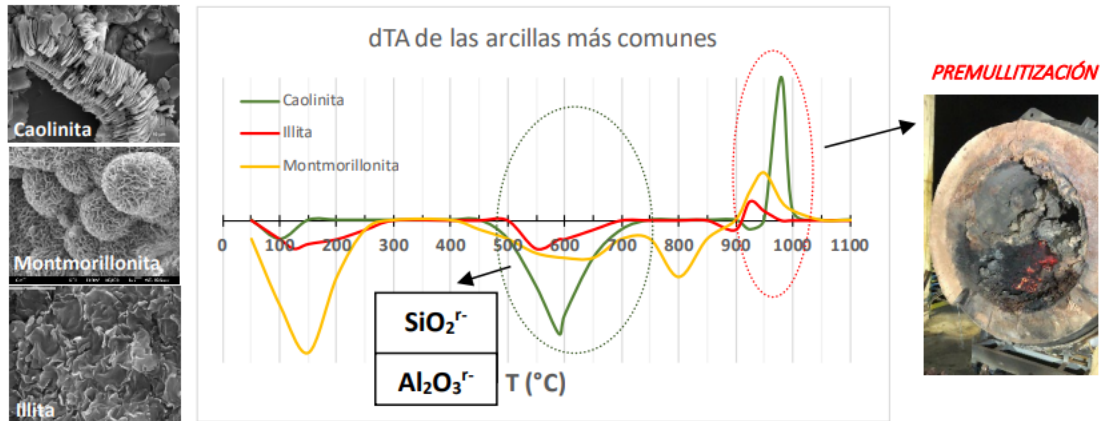
- **SiO₂**: Dióxido de Sílice
- **Al₂O₃**: Trióxido de Aluminio
- **H₂O**: Agua
- **MgO**: Oxido de Magnesio
- **K₂O**: Oxido de Potasio

4.2.3 Características de las arcillas activadas

Las arcillas en su estado natural, no presentan propiedades reactivas con el cemento, es por esta razón que las arcillas deben someterse a un proceso de activación térmico que sea capaz de modificar su estructura, a este proceso se le conoce como activación y se realiza a temperaturas superiores a los 600 °C hasta los 1100°C, esto conforme al tipo de arcilla (Talero Morales, 2020).

Los tres tipos de arcillas mencionados en el numeral anterior pueden ser sometidas a activación con la temperatura y proceso adecuado, este proceso se logra por medio de una reacción química que se conoce como deshidroxilación de la red cristalina de las arcillas. El punto de deshidroxilación de las arcillas se logra medir con un TGA, el cual mediante pérdidas y ganancias de masa conforme al aumento de la temperatura se identifica la temperatura de activación óptima. (Talero Morales, 2020)

Figura 1.
Análisis termogravimétrico de las arcillas.

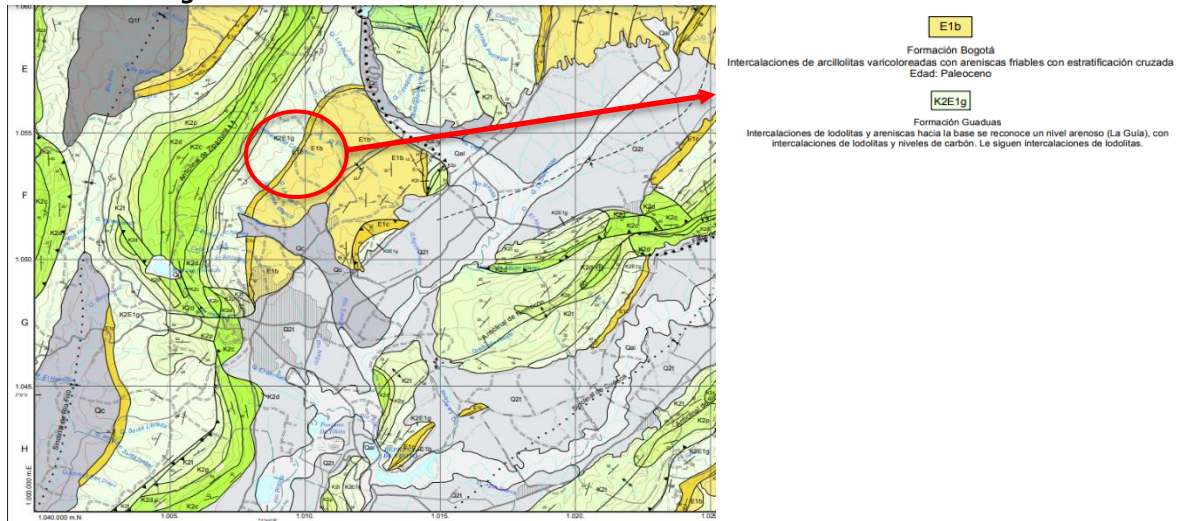


Nota: Información tomada de Talero Morales, R. (2020). El rol de las arcillas activadas térmicamente para el alcance de la neutralidad medioambiental por la industria del cemento.

4.2.4 Explotación de la arcilla

Previamente a la explotación se debe realizar un estudio de suelos en donde se identifique el tipo de arcilla, características, cantidad y calidad de la misma, esto con el fin de determinar la viabilidad de explotación. Para la mina de Nemocón se tiene definida la siguiente geología:

Figura 2.
Análisis termogravimétrico de las arcillas.



Nota: Catálogo de propiedades físicas, químicas y mineralógicas de las arcillas Sabana de Bogotá. INGEOMINAS 2003

En la ladrillera San Mateo, se tiene la cantera de explotación de arcilla cruda de tipo Montmorillonítica, esta está ubicada en Nemocón sector pajarito, se realiza la explotación de 70 toneladas de arcilla el día lunes 15 de abril de 2024.

4.2.5 Producción de arcilla Activada

Una vez obtenida la arcilla de la explotación, esta es transportada mediante bandas hasta el proceso de homogenización, en donde por medio de flautas se le adiciona agua para hasta llevarla a la plasticidad necesaria para que la extrusora puede moldear de forma correcta el bloque de arcilla cruda.

Figura 3.
Transporte de arcilla cruda.



Nota: Elaboración Propia

Figura 4.
Extrusión de arcilla cruda para la elaboración del ladrillo.



Nota: Elaboración propia

Con la consistencia adecuada, la máquina de extrusión le da forma a una sola pieza de arcilla, a medida que la pieza avanza, se van cortando bloques de la medida especificada, para así tener un bloque de arcilla cruda moldeado. Estos son llevados a un horno primario, por medio de aire caliente, los ladrillos son secados hasta el punto donde ya puedan ser llevados a un horno de calcinación.

Figura 5.
Secado de los ladrillos.



Nota: Elaboración propia

Una vez finalizado el proceso de secado, los ladrillos son acomodados uno encima del otro en el horno de calcinación, en la ladrillera San Mateo cuentan con un horno tipo Hoffman, el cual calcina la arcilla a una temperatura de 650°C durante 10 horas. Una vez finalizado el proceso de activación, se procede con el enfriamiento de los bloques de arcilla activada.

Figura 6.

Calcinación de los bloques a una temperatura de 650°C en un horno Hoffman.



Nota: Elaboración propia

Los bloques que ya cuentan con la temperatura adecuada, pueden ser transportados a patios de almacenamiento, en donde se acopian en estivas y son enviados a distribución. Para el caso del proyecto de grado, estos son enviados a una fase de molienda ya que debe cumplir con un parámetro de finura de 45µm (Tamiz 325) del 8% al 10%.

4.3 Diseño de Mezcla

En el mundo y a través de la historia se ha realizado diversos estudios e investigaciones de la tecnología del concreto, Orlando Bolívar (1987) Señala:

El siglo XX marca una nueva etapa en el conocimiento científico y técnico del material. Fue precisamente el ingeniero francés Rene Feret quien probablemente realizó el primer estudio racional sobre el desafío de mezclas de hormigón entre los años 1892-1897 (Laboratorios de Ponts et Chaussees); a Feret le siguieron Abrams, Fuller, Weymouth, Thaulow, Walker, Goldbek, Gray, Talbot, etc. quienes cimentaron las bases para la moderna tecnología del hormigón” (p. 9).

Estas investigaciones llevaron a que se desarrollaran diversos métodos de diseño del concreto por lo cual tratar de abarcar todas las teorías o métodos de diseño es un trabajo laborioso y extenso.

En Colombia los procesos constructivos y la producción de material como el concreto está regulada por la normativa sísmo resistente NSR – 10, esta normatividad nos dirige a las normas técnicas colombianas que están reguladas por el ICONTEC (Organismo multinacional de carácter privado sin ánimo de lucro para fomentar la normalización, la certificación, la metrología y la gestión de calidad en Colombia).

Esta normativa hace referencia a instituciones a nivel internacional que se dedican a la investigación de la tecnología de materiales de construcción como el concreto algunas de estas instituciones son; ACI, PCA, AASHTO, ASTM, EFNARC, entre otros.

La determinación de las cantidades de los materiales para una mezcla de concreto se le llama o se conoce generalmente como diseño de mezcla. Para determinar el diseño de una mezcla de concreto se deben contemplar diversos factores y usos del material a crear o diseñar, estos varían según su uso y aplicación en una estructura de construcción o elemento constructivo. La PCA (Portland Cement Association) señala 3 características principales para poder realizar un diseño de mezcla “(1) propiedades del concreto fresco, (2) propiedades mecánicas del concreto endurecido y (3) la inclusión, exclusión o límites de ingredientes específicos. El diseño de la mezcla lleva al desarrollo de la especificación del

concreto” (PCA, 2004, p. 187). Las proporciones de materiales a escoger del diseñador de concreto estarán ligadas a los materiales locales, su costo, y su uso de aplicación, la PCA señala “Un concreto adecuadamente proporcionado debe presentar las siguientes cualidades: Trabajabilidad aceptable del concreto fresco, Durabilidad, resistencia y apariencia uniforme del concreto endurecido, y Economía” (PCA, 2004, p. 187).

Para la realización del diseño de mezcla es importante determinar los parámetros que exigen la norma NSR-10, como es la resistencia mecánica del concreto. La NSR-10 título C Señala “F’C que significa resistencia especificada a la compresión Mpa” (NSR 10 Titulo C, 2010, p. 15); esta resistencia (F’C), es la requerida a dar cumplimiento donde la meta es lograr alcanzar o superar el F’C estipulado, después de realizar un promedio de tres ensayos consecutivos a la resistencia mecánica del concreto a 28 días.

Otro parámetro importante del diseño de mezcla del concreto es la relación agua/material cementante (A/MC), esta nos va a fijar la cantidad de pasta que pueda obtener el concreto realizado o recién mezclado. Un punto de partida para el diseñador puede estar guiado por la American Concrete Institute (ACI), quienes han realizado un método empírico donde recomiendan una cantidad de agua según la fluidez del concreto, su resistencia y tamaño de la grava a usar.

4.4 Fundamentos del concreto

El concreto es un material compuesto por diferentes materias primas y es muy común en el ramo de la ingeniería civil, y la construcción. La PCA (2004) hace una definición muy específica donde resalta:

El concreto (hormigón) es básicamente una mezcla de dos componentes: agregados y pasta. La pasta, compuesta de cemento portland y agua, une los agregados, normalmente arena y grava (piedra triturada piedra machacada, pedrejón), creando una masa similar a una roca. Esto ocurre por el endurecimiento de la pasta en consecuencia de la reacción

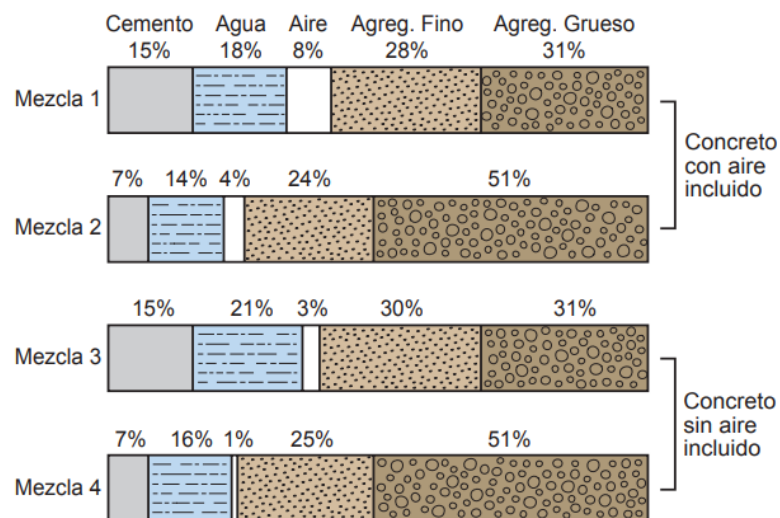
química del cemento con el agua. Otros materiales cementantes (cementicios, cementosos) y adiciones minerales se pueden incluir en la pasta” (p. 1).

PASTA

La pasta se compone de materiales cementantes, agua y aire atrapado o aire incluido (intencionalmente incorporado). La pasta constituye aproximadamente del 25% hasta 40% del volumen total del concreto. La Figura 1 muestra que el volumen absoluto del cemento está normalmente entre 7% y 15% y el volumen del agua está entre 14% y 21%. El contenido de aire atrapado varía del 4% hasta 8% del volumen” (PCA, 2004, p. 1)

Figura 7.

Variaciones de las proporciones usadas en una mezcla de concreto en volumen absoluto.



Nota: PCA (2004) Portland Cement Association

En la anterior imagen podemos ver la importancia de los agregados en una mezcla de concreto por ende la PCA (2004) nos hace una aclaración bastante importante:

Como los agregados constituyen aproximadamente del 60% al 75% del volumen total del concreto, su selección es muy importante. Los agregados deben componerse de partículas con resistencia mecánica adecuada y con resistencia a las condiciones de exposición y no deben contener materiales que puedan causar deterioro del concreto. La granulometría continua de tamaños de partículas es deseable para el uso eficiente de la pasta (p. 3)

MEZCLADO

El mezclado del concreto debe garantizar que las partículas de las materias primas que lo componen no separen la pasta del agregado grueso, debido que en ocasiones se encuentran diseños de concretos con una abundante cantidad de grava lo que puede llevar a que la colocación del mismo se vea afectada dejando muchas llenantes faltantes y el elemento constructivo no se encuentre en las condiciones esperadas; generalmente en las obras se ven concretos plásticos y fluidos para que su colocación sea mucho más adecuada, sin embargo existen diversas aplicaciones y colocaciones que requieren diferentes fluidez del concreto y así mismo su trabajabilidad, estas varían según su uso y requerimiento de la obra o construcción que se lleva a cabo.

TRABAJABILIDAD

“La facilidad de colocación, consolidación y acabado del concreto fresco y el grado que resiste a la segregación se llama trabajabilidad. El concreto debe ser trabajable pero los ingredientes no deben separarse durante el transporte y el manejo” (PCA, 2004, p. 3)

SANGRADO Y ASENTAMIENTO

La PCA (2004) explica el sangrado y el asentamiento como:

Sangrado (exudación) es el desarrollo de una lámina de agua en el tope o en la superficie del concreto recién colocado. Es causada por la sedimentación (asentamiento) de las partículas sólidas (cemento y agregados) y simultáneamente la subida del agua hacia la superficie” (p. 4)

CONSOLIDACION

La vibración mueve las partículas del concreto recién mezclado, reduce el rozamiento (fricción) entre ellas y les da la movilidad de un fluido denso. La acción vibratoria permite el uso de mezclas más rígidas con mayores proporciones de agregado grueso y menores proporciones de agregados finos. (PCA, 2004, p. 4)

TIEMPO DE FRAGUADO

El tiempo de fraguado es el proceso en el cual el concreto pasa de un estado plástico a estado endurecido, la PCA (2004) define este estado parcial del concreto:

El conocimiento de la velocidad de reacción entre el cemento y el agua es importante porque determina el tiempo de fraguado y endurecimiento. La reacción inicial debe ser suficientemente lenta para que haya tiempo para transportar y colocar el concreto. Una vez que el concreto ha sido colocado y acabado, es deseable un endurecimiento rápido. (p. 6)

CURADO

El aumento de la resistencia con la edad continúa desde que (1) el cemento no hidratado aún esté presente, (2) el concreto permanezca húmedo o la humedad relativa del aire esté arriba de aproximadamente 80% (Powers 1948), (3) la temperatura del concreto

permanezca favorable y (4) haya suficiente espacio para la formación de los productos de hidratación. Cuando la humedad relativa dentro del concreto baja hasta cerca de 80% o la temperatura del concreto baja para menos del cero, la hidratación y la ganancia de resistencia se interrumpen. (PCA, 2004, p. 7)

RESISTENCIA

Una de las principales propiedades del concreto en estado endurecido es la resistencia a la compresión, esta propiedad se caracteriza por lo siguiente:

La resistencia a compresión se puede definir como la medida máxima de la resistencia a carga axial de especímenes de concreto. Normalmente, se expresa en kilogramos por centímetros cuadrados (kg/cm^2), megapascuales (MPa) o en libras por pulgadas cuadradas (lb/pulg^2 o psi) a una edad de 28 días. (PCA, 2004, p. 8)

MASA VOLUMETRICA

El concreto convencional, normalmente usado en pavimentos, edificios y otras estructuras, tiene masa volumétrica (masa unitaria, densidad) que varía de 2200 hasta 2400 kg/m^3 (137 hasta 150 libras/piés³). La masa volumétrica del concreto varía dependiendo de la cantidad y la densidad del agregado, la cantidad de aire atrapado (ocluido) o intencionalmente incluido y las cantidades de agua y cemento. (PCA, 2004, p. 10)

4.5 Fundamentos de las adiciones del concreto

Las adiciones minerales para concreto las define Matallana (2019) como “Puzolanas o materiales cementantes suplementarios: también conocidos como adiciones, son productos no cementantes por sí

solos, pero cuando actúan conjuntamente con el cemento y el agua, a temperaturas normales, reaccionan químicamente formando productos estables que sí son cementantes.” (p. 38)

Dentro de estas adiciones podemos encontrar diferentes tipos y procedencias, a continuación, una breve descripciones de cada una de ellas:

Puzolanas naturales: Son definidas principalmente como:

Las puzolanas naturales más comunes son las cenizas de origen volcánico: pumitas, pizarras y pedernales opalinos, entre otras. Existen también rocas de origen orgánico, como las tierras formadas por algas o esqueletos de animales (tierras diatomáceas o de infusorios), caracterizadas por su alta superficie específica (finura) y por su alto contenido de sílice, aunque suelen consumir mayor cantidad de agua en la mezcla por su estructura porosa y forma angular. (Matallana, 2019, p. 38)

Escorias de alto horno: Este tipo de adición es un subproducto de la producción de hierro y es definida como:

La escoria de alto horno se caracteriza porque tiene, en esencia, los mismos componentes químicos del cemento: cal, sílice y alúmina, que le dan una actividad química intrínseca y potencial de formar productos cementantes estables. En este caso, el hidróxido de calcio liberado, se convierte en un agente que da inicio a la reacción con la escoria. (Matallana, 2019, p. 39)

Humo de sílice: Al igual que las escorias de alto horno, el humo de sílice es un subproducto de la producción del acero, sin embargo, es el residuo de la emisión de los gases.

Es un material muy rico en sílice amorfa, tiene un tamaño de partícula aproximadamente 100 veces más pequeño que el grano de cemento, es de forma esférica con una densidad

de 2.200 kg/m³. Por sus características, el humo de sílice es utilizado en la producción de concretos de baja permeabilidad, altas resistencias y, en general, para los concretos denominados de alto desempeño. (Matallana, 2019, p. 39)

Ceniza volante (Fly Ash): La ceniza es producto de la combustión del carbón usado en las termoeléctricas u hornos donde sea necesario su uso:

La norma ASTM C618 clasifica la ceniza volante dependiendo del tipo de carbón y su procedencia. Cuando es un carbón bituminoso que tiene alto contenido de sílice, recibe el nombre de Ceniza Volante Clase F. Cuando es sub bituminoso, es decir, que contiene alta cantidad de calcio, es denominado Ceniza Volante Clase C. La Clase F tiene propiedades puzolánicas (necesita la cal producida por el cemento al hidratarse), mientras que la Clase C puede tener propiedades cementantes por sí sola (latentes). (Matallana, 2019, p. 40)

Arcilla Activada: La arcilla activada es ampliamente usada como adición para la producción de cemento portland:

Los cementos adicionados se producen por la molienda uniforme y conjunta o por la mezcla de dos o más tipos de materiales finos. Los materiales principales son cemento portland, escoria granulada de alto horno, ceniza volante, humo de sílice, arcilla calcinada, otras puzolanas, cal hidratada y combinaciones premezcladas de estos materiales. (PCA, 2004, p.35)

Sin embargo, esta no ha tenido el mismo uso como adición mineral para concreto sin afectar su desempeño, su uso se fundamenta en lo siguiente:

Tanto la caolinita, como la montmorillonita y la illita, sometidas a un calentamiento adecuado, pueden activarse como resultado de un proceso de deshidroxilación que sufren o pérdida de grupos OH⁻ de su red cristalina. Mediante el proceso de activación térmica de las arcillas se está produciendo una puzolana artificial con carácter químico aluminico. (Talero Morales, 2020)

5. Metodología

5.1 Molienda y Caracterización Arcilla activada

Ya finalizado el proceso de activación, los bloques son llevados a molienda, en donde son triturados hasta llevarlos a un tamaño máximo de 3 pulgadas, esto con el fin de molerlos finamente mediante un molino de bolas durante tres horas, con una especificación de retenido en malla 325 de máximo 8%, esta finura es considerada óptima para alcanzar la reactividad necesaria dentro de la mezcla de concreto. (Talero Morales, 2020)

Figura 8.***Molino de bolas con carga abrasiva para moler a finura de 8%.***

Nota: Elaboración propia

Ya con la arcilla activada molida, procedemos con la caracterización química, esta nos dará un parámetro sobre la composición mineralógica y como esta podría trabajar en conjunto con el cemento. Para esto, se realiza un análisis por DRX, arrojando los siguientes resultados.

Tabla 2.***Composición mineralógica arcilla activada DRX.***

COMPUESTO	%
Cuarzo	52.4
Caolinita	6.3
Mucovita	3.6
Hematita	0.2
Amorfos	37.5

Nota: Elaboración propia

Paralelamente se realizó el ensayo de FRX, con el fin de determinar los compuestos presentes dentro de la arcilla activada, arrojando los siguientes resultados:

Tabla 3.
Compuestos de la arcilla activada FRX.

COMPUESTO	%
Al ₂ O ₃	14.73
CaO	0.76
Fe ₂ O ₃	5.60
SiO ₂	68.99

Nota: Elaboración propia

El procedimiento de DRX y FRX consiste en exponer a los rayos X una muestra, esta exposición genera una dispersión de las ondas, para cada elemento hay una onda y por lo tanto una intensidad de dispersión diferente, de acuerdo con el ángulo que se genera, se puede determinar a qué elemento corresponde.

5.2 Propiedades y características cemento ART

El cemento tipo ART o de alta resistencias tempranas, debe cumplir con los requerimientos de la NTC 121:2023

Tabla 4.
Especificación por desempeño NTC 121.

Tipo de cemento	Método de ensayo aplicable	UG	ART	MRS	ARS	MCH	BCH
Contenido de aire en volumen de mortero, % máx.	NTC 224	12	12	12	12	12	12
Resistencia mín. a la compresión, MPa	NTC 220						
1 día		...	11,0	...	...	...	...
3 días		8,0	22,0	11,0	11,0	5,0	...
7 días		15,0	...	18,0	18,0	11,0	11,0
28 días		24,0	...	...	25,0	...	21,0
Calor de hidratación, kJ/kg (cal/g)	NTC 6270						
3 días		...	...	...	...	335 (80)	200 (50)
7 días		...	...	...	...	...	225 (55)
Expansión de barra de mortero 14 días, % máx.	NTC 4927	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020
Expansión por sulfatos (resistencia a los sulfatos) ^E	NTC 3330						
6 meses, máx., %		...	...	0,10	0,05	...	...
1 año, máx., %		...	...	...	0,10	...	...

Nota: Información tomada de la NTC 121(2023)

Los requisitos de desempeño mínimos del cemento estas estipulados en la tabla 1 de la NTC 121, estos requisitos los deben cumplir todos aquellos productores de cemento los cuales sean proveedores y quieran contar con la certificación Icontec, para el cemento HOLCIM tipo ART, los valores de desempeño son los siguientes:

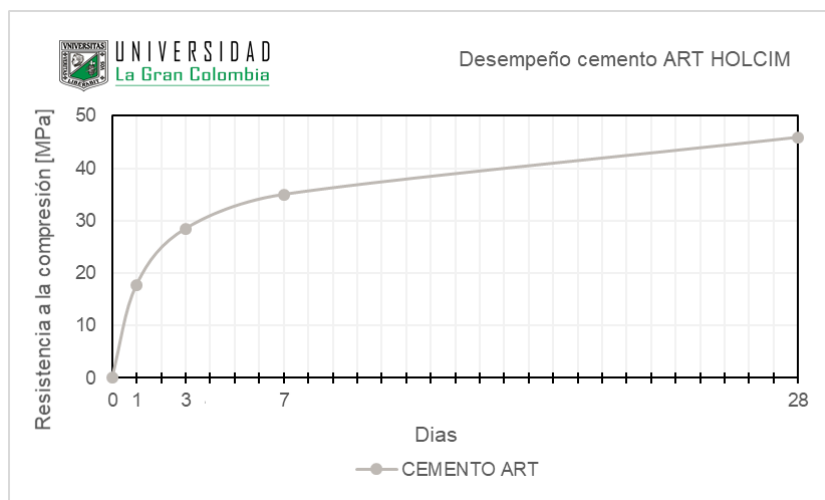
Tabla 5.
Desempeño cemento tipo ART Industrial HOLCIM.

ENSAYO	UNIDAD
Resistencia a 1 día	17.8 MPa
Resistencia a 3 días	28.5 MPa
Resistencia a 7 días	35 MPa
Resistencia a 28 días	45.9 MPa
Fraguado inicial	127 min
Fraguado final	227 min

Nota: Elaboración propia

La curva de evolución es la siguiente:

Figura 9.
Evolución de resistencia a la compresión cemento ART.



Nota: Elaboración propia

5.3 Caracterización agregado grueso y fino

Siguiendo el procedimiento descrito en la NTC 77 (2018):

Encaje los tamices en orden decreciente según el tamaño de las aberturas de arriba hacia abajo y coloque la muestra en el tamiz superior. Agite los tamices manualmente, o mediante el uso de equipos mecánicos, por un tiempo suficiente, establecido al tanteo o controlado por mediciones en la muestra de ensayo real.

Determine la masa de cada incremento de tamaño en una balanza o báscula, con una precisión del 0,1 % de la masa de muestra seca total original. La masa total del material después del tamizado debería controlarse rigurosamente a partir de la masa original de la muestra colocada en los tamices.

Granulometría Agregado grueso

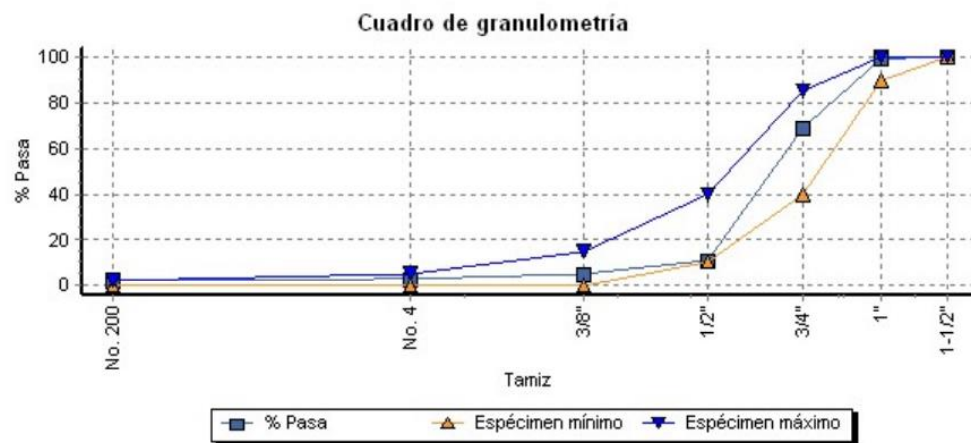
Tabla 6.

Granulometría agregado grueso procedencia Mondoñedo.

Tamiz (mm)	% Pasa	Especificación	
		Mín	Máx
1-1/2"	100.0	100.0	100.0
1"	99.1	90.0	100.0
3/4"	68.7	40.0	85.0
1/2"	10.6	10.0	40.0
3/8"	4.7	0.0	15.0
No. 4	2.9	0.0	5.0
No. 200	1.7	0.0	1.5

Nota: Elaboración propia

Figura 10.
Curva granulométrica agregado grueso.



Nota: Elaboración propia

Granulometría Agregado fino

Tabla 7.
Granulometría agregado fino procedencia rio Guayuriba .

Tamiz (mm)	% Pasa	Especificación	
		Mín	Máx
3/8"	95.7	100.0	100.0
No. 4	86.5	85.0	100.0
No. 8	67.5	60.0	80.0
No. 16	52.4	45.0	65.0
No. 30	36.8	30.0	55.0
No. 50	17.8	15.0	35.0
No. 100	6.8	2.0	20.0
No. 200	4.0	0.0	5.0

Nota: Elaboración propia

Figura 11.
Curva granulométrica agregado fino.

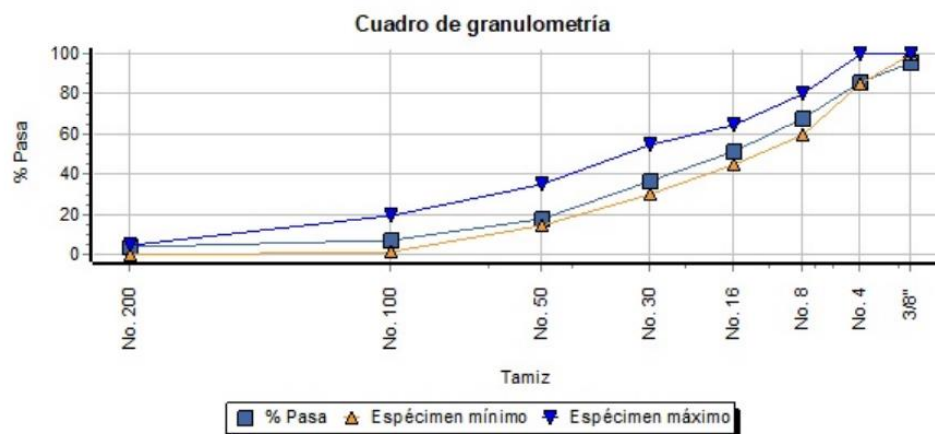


Tabla 8.
Caracterización de agregados para la mezcla de concreto.

CARACTERIZACIÓN AGREGADOS				
Propiedad	Cemento	Adición	Grava	Arena
Fuente	Holcim	Planta Nemocón	Holcim	Guayuriba
Densidad [g/cm ³]	3.1	2.1	2.38	2.6
Absorción [%]	-	-	4.56	1.2
Tamaño máximo	-	-	25 mm	-

Nota: Elaboración propia

5.4 Diseño de mezclas de concreto planta Puente Aranda – Bogotá (HOLCIM)

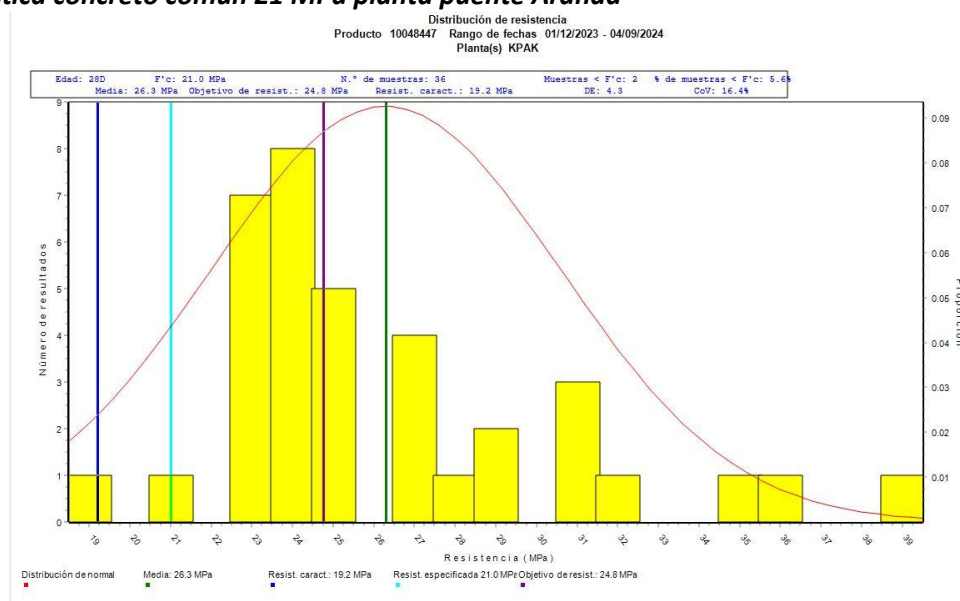
Con el fin de determinar la reactividad de la arcilla activada dentro de una mezcla de concreto, se definió usar un diseño que tuviera un volumen alto dentro de la operación diaria de la planta de concreto de HOLCIM ubicada en Puente Aranda Bogotá, este diseño ya cuenta con las optimizaciones por desviaciones mencionados en la NSR 10 título C, este está definido con las siguientes proporciones:

Tabla 9.
Diseño de concreto planta Puente Aranda HOLCIM.

Material	Masas
Cemento [kg]	335
Adición [kg]	-
Grava 1 (19mm) [kg]	793
Arena 1 Trituración [kg]	935
Agua [lts]	185
Asentamiento de salida [mm]	120
Edad de especificación [días]	28
Resistencia característica [MPa]	21

Nota: Elaboración propia

Figura 12.
Estadística concreto común 21 MPa planta puente Aranda



Nota: Información suministrada por HOLCIM

La grafica anterior fue proporcionada por la planta de HOLCIM puente Aranda, los datos allí presentados corresponden a la evaluación estadística de 10 meses de la producción del concreto de 21 MPa, la curva presentada en la gráfica, cumple los requisitos de la NTC 2275 numeral 3.3, en donde señala los tipos de curvas que se pueden dar en una producción de concreto.

5.5 Procedimiento de mezcla concreto testigo

El diseño de mezcla del concreto testigo será el mismo utilizado por la planta, este será corregido de acuerdo a las humedades del agregado fino y grueso para un trompo de 20 litros.

Tabla 10.

Procedimiento mezcla concreto testigo.

Material	PRUEBA TESTIGO	Para 20 litros
Cemento [kg]	335	6.7
Adición [kg]	-	
Grava 1 (19mm) [kg]	793	19.14
Arena 1 Trituración [kg]	935	15.86
Agua [lts]	185	3.26
Asentamiento de salida [mm]	120	
Edad de especificación [días]	28	
Resistencia característica [MPa]	21	

CORRECCIÓN HUMEDAD				
Material	Humedad total (%)	Absorción (%)	Humedad libre (%)	Corrección
Arena 1	3.55	1.20	2.35	0.44
Arena 2				
Arena 3				
Grava 1	0.20	4.56	-4.36	
Grava 2				
Grava 3				0.00
Total				0.44

Nota: Elaboración propia

Se sigue el siguiente procedimiento de mezclado del concreto patrón, con el fin de llegar al asentamiento objetivo de 120 mm de asentamiento.

- ✓ Toma de humedades de los agregados.
- ✓ Mezclar primero los agregados gruesos y finos por 3 minutos.
- ✓ Adicionar el cemento, dejar homogeneizar por 3 minutos.
- ✓ Adicionar el 70% del agua, dejar mezclar por 3 minutos.
- ✓ Adicionar el 30% de agua restante, mezclar por 3 minutos más.
- ✓ En caso de no alcanzar el asentamiento objetivo, se debe agregar agua y registrar la cantidad adicionada.

Figura 13.
Contenido de cemento mezcla testigo.



Nota: Elaboración propia

5.6 Procedimiento de mezcla concreto con 5% adición de Arcilla Activada

Para el diseño de mezcla con 5% de adición de arcilla activada, se reemplaza en masa de cemento, y se le adiciona en conjunto con el cemento para una correcta homogenización en la mezcladora. Se sigue el mismo procedimiento de mezclado que la prueba testigo.

Tabla 11.
Procedimiento mezcla concreto con 5% de arcilla activada.

Material	PRUEBA 1 - ADICIÓN 5% ARCILLA ACTIVADA	Para 20 litros
Cemento [kg]	318.25	6.37
Adición [kg]	16.75	0.34
Grava 1 (19mm) [kg]	790	19.04
Arena 1 Trituración [kg]	930	15.8
Agua [lts]	185	3.02
Asentamiento de salida [mm]	120	
Edad de especificación [días]	28	
Resistencia característica [MPa]	21	

Nota: Elaboración propia

Figura 14.
Contenido de arcilla activada 5% de adición



Nota: Elaboración propia

5.7 Procedimiento de mezcla concreto con 10% adición de Arcilla Activada

Para la ejecución de la prueba 2, la cual tiene una adición del 10% de arcilla activada, se reemplaza este porcentaje en la masa de cemento, con el fin de una correcta homogenización de la prueba.

Tabla 12.
Procedimiento mezcla concreto con 10% de arcilla activada.

Material	PRUEBA 2 - ADICIÓN 10% ARCILLA ACTIVADA	Para 20 litros
Cemento [kg]	301.5	6.03
Adición [kg]	33.5	0.67
Grava 1 (19mm) [kg]	790	18.89
Arena 1 Trituración [kg]	923	15.8
Agua [lts]	185	2.87
Asentamiento de salida [mm]	120	
Edad de especificación [días]	28	
Resistencia característica [MPa]	21	

Nota: Elaboración propia

Figura 15.
Contenido de arcilla activada 10% de adición.



Nota: Elaboración propia

5.8 Procedimiento de pruebas de concreto en estado fresco

5.8.1 Asentamiento

Con base en la NTC 396 (2024) establece el procedimiento para medir el asentamiento:

Ubique el molde a nivel del suelo y sosténgalo firmemente con los pies o con un sostenedor y llénelo con la muestra de concreto en tres capas. Cada capa debe compactarse con 25 inserciones, con la punta redondeada de la varilla, distribuidas uniformemente sobre su sección transversal.

Retire el molde inmediatamente, levantándolo cuidadosamente en dirección vertical. Levante el molde una distancia de 300 mm (12 pulgadas) durante $5 \text{ s} \pm 2 \text{ s}$, mediante un movimiento uniforme hacia arriba, sin producir movimiento lateral o de torsión al concreto. La operación completa, desde que se comienza a llenar el molde hasta que se retira, debe efectuarse sin interrupción, durante un tiempo máximo de 2 1/2 min. (p. 7)

5.8.2 Temperatura

Conforme al procedimiento que establece la NTC 3357 (2013):

Se coloca el dispositivo de medición en el concreto fresco, de manera que el sensor quede sumergido mínimo 75 mm. Se presiona suavemente la superficie del concreto, alrededor del dispositivo de medición de temperatura, de manera que la temperatura ambiente del aire no afecte la lectura.

Se deja el dispositivo de medición en el concreto fresco durante un período mínimo de 2 min, pero no más de 5 min. Luego se toma y se registra la temperatura, con aproximación de 0,5 °C. No se debe sacar el dispositivo del concreto, mientras se está haciendo la lectura de la temperatura. (p. 4)

5.8.3 Contenido de aire

Se realiza el ensayo de contenido de aire acorde al procedimiento descrito en la NTC 1032 (2013):

Se coloca el concreto en el recipiente de medida, en tres capas de aproximadamente igual volumen. Se compacta cada capa de concreto con 25 golpes con el extremo redondeado de la varilla, distribuidos uniformemente en toda la sección. Después de apisonar cada capa, se golpean vigorosamente los lados del molde con un mazo, de 10 a 15 veces, para cerrar cualquier vacío dejado por la varilla de apisonado y para sacar las burbujas de aire más grandes que pudieron quedar atrapadas. La capa del fondo se compacta en todo su espesor, pero teniendo cuidado de no golpear el fondo del molde.

Se cierra la válvula de purga de aire en la cámara de aire y se bombea aire dentro de esta cámara hasta que la manecilla del manómetro esté en la línea de presión inicial. Se dejan

pasar algunos segundos para que el aire comprimido se enfríe a la temperatura normal.

(p. 10)

5.8.4 Exudación visual

Una vez realizadas las probetas de concreto se realiza un seguimiento a la lámina de agua que empieza a subir por la densidad del concreto, verificando que esta no sea superior a la de la mezcla patrón.

Figura 16.

Cilindros de concreto después de 30 minutos para la prueba de exudación visual.



Nota: Elaboración propia

Se logra evidenciar en un lapso de 30 minutos, que ninguna de las mezclas realizadas presenta exudación.

5.9 Procedimiento de pruebas de concreto en estado endurecido

5.9.1 Resistencia a la compresión

Los especímenes de concreto son llevados a curado, 24 horas después de su elaboración y estos son ensayados a los 3, 7 y 28 días, en este lapso de tiempo se deben mantener en curado y retirados

únicamente para realizar el ensayo a la compresión, para cada una de las mezclas se realizaron 8 cilindros de concreto para fallar de la siguiente manera:

Tabla 13.

Conformación de especímenes de concreto y edades de falla.

CANT. ESPECIMENES A COMPRESIÓN

DIAS	MEZCLA PATRÓN	5% AA	10% AA
3	2	2	2
7	2	2	2
28	3	3	3

Nota: Elaboración propia

Los especímenes deben ser fallados con una tolerancia de tiempo descrita en NTC 673 de la siguiente manera:

Tabla 14.

Tolerancias de ensayo de resistencia a la compresión.

Edad de ensayo ^A	Tolerancia admisible
24 h	± 0,5 h
3 d	± 2 h
7 d	± 6 h
28 d	± 20 h
90 d	± 2 d
^A Para las edades de ensayo no presentadas en esta tabla, la tolerancia para la edad de ensayo es ± 2 % de la edad especificada.	

Nota: Información tomada de la NTC 673 (2013)

El procedimiento para realizar el fallo de las probetas de concreto, la NTC 673 (2013) lo describe de la siguiente manera:

Aplique la carga de compresión hasta que el indicador de carga de la máquina muestre que la carga está decreciendo constantemente y el espécimen muestre un patrón de fractura bien definido (Tipos 1 a 4 en la Figura 2). En el caso de máquinas de ensayo equipadas con un detector de rotura de espécimen, no se permite el apagado automático de la máquina hasta que la carga haya caído por debajo del 95 % de la carga máxima. (p.

12)

6. Resultados procedimiento concreto testigo

6.1 Resultados en estado fresco

Tabla 15.

Resultados en estado fresco concreto testigo.

Mezclas	Adición de agua [lts/m ³]	Relación a/mc Teórica	Relación a/mc Real	Masa unitaria [kg]	Temperatura [°C]	Contenido de aire [%]	Asentamiento (mm)
PRUEBA TESTIGO	0	0.55	0.55	2248	23.8	2	110

Nota: Elaboración propia

Figura 17.

Asentamiento de salida concreto testigo.



Nota: Elaboración propia

Figura 18.
Contenido de aire concreto testigo.



Nota: Elaboración propia

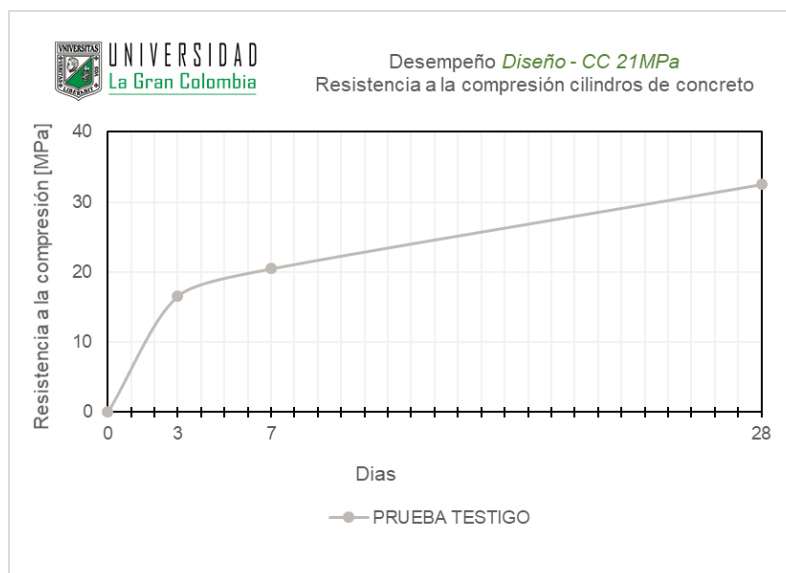
6.2 Resultados en estado endurecido

Tabla 16.
Resultados en estado endurecido concreto patrón.

Mezclas	Edad [Días]	Fecha de falla	Resistencia [MPa]	Resistencia [%]
PRUEBA TESTIGO	3	30/06/2024	16.57	78.9
	7	04/07/2024	20.47	97.5
	28	25/07/2024	32.48	154.7

Nota: Elaboración propia

Figura 19.
Desempeño de resistencia concreto testigo.



Nota: Elaboración propia

7. Resultados procedimiento con 5% adición de Arcilla Activada

7.1 Resultados en estado fresco

Tabla 17.
Resultados en estado fresco concreto con 5% de arcilla activada.

Mezclas	Adición de agua [lts/m3]	Relación a/mc Teórica	Relación a/mc Real	Masa unitaria [kg]	Temperatura [°C]	Contenido de aire [%]	Asentamiento (mm)
PRUEBA 1 - ADICIÓN 5% ARCILLA ACTIVADA	-12	0.55	0.52	2248	23.1	1.9	117

Nota: Elaboración propia

Figura 20.**Asentamiento de salida concreto con 5% de arcilla activada**

Nota: Elaboración propia

Figura 21.**Contenido de aire concreto con 5% de arcilla activada**

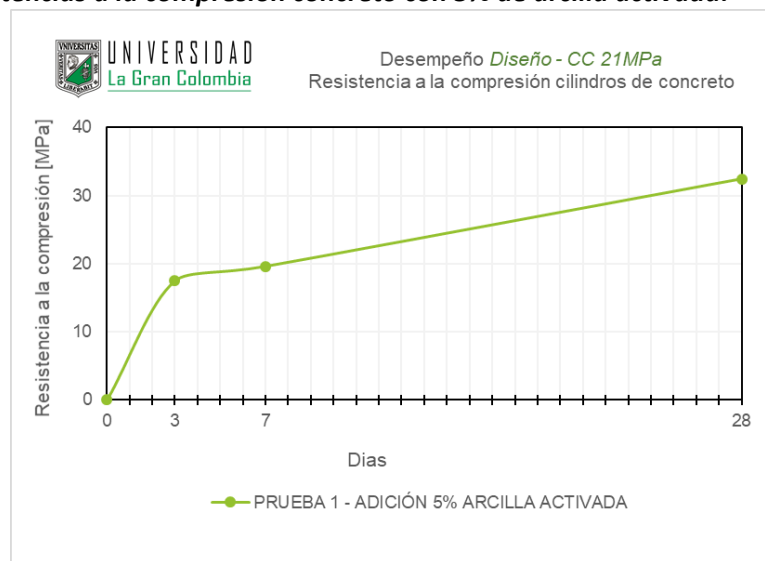
Nota: Elaboración propia

7.2 Resultados en estado endurecido

Tabla 18.**Resultados en estado endurecido con 5% de arcilla activada.**

Mezclas	Edad [Días]	Fecha de falla	Resistencia [MPa]	Resistencia [%]
PRUEBA 1 - ADICIÓN 5% ARCILLA ACTIVADA	3	30/06/2024	17.50	83.3
	7	04/07/2024	19.63	93.5
	28	25/07/2024	32.46	154.6

Nota: Elaboración propia

Figura 22.**Desempeño resistencias a la compresión concreto con 5% de arcilla activada.**

Nota: Elaboración propia

8. Resultados procedimiento con 10% adición de Arcilla Activada

8.1 Resultados en estado fresco

Tabla 19.**Resultados en estado fresco concreto con 10% de arcilla activada.**

Mezclas	Adición de agua [lts/m3]	Relación a/mc Teórica	Relación a/mc Real	Masa unitaria [kg]	Temperatura [°C]	Contenido de aire [%]	Asentamiento (mm)
PRUEBA 2 - ADICIÓN 10% ARCILLA ACTIVADA	-20	0.55	0.49	2248	22	1.6	114

Nota: Elaboración propia

Figura 23.**Asentamiento de salida concreto con 10% de arcilla activada.**

Nota: Elaboración propia

Figura 24.**Contenido de aire concreto con 10% de arcilla activada**

Nota: Elaboración propia

8.2 Resultados en estado endurecido

Tabla 20.

Resultados en estado endurecido con 10% de arcilla activada.

Mezclas	Edad [Días]	Fecha de falla	Resistencia [MPa]	Resistencia [%]
PRUEBA 2 - ADICIÓN 10% ARCILLA ACTIVADA	3	30/06/2024	13.67	65.1
	7	04/07/2024	19.06	90.8
	28	25/07/2024	30.99	147.6

Nota: Elaboración propia

Figura 25.

Desempeño de resistencias a la compresión concreto con 10% de arcilla activada



Nota: Elaboración propia

9. Análisis comparativo de resultados

Una vez finalizadas pruebas, se llevan los ocho cilindros de concreto debidamente identificados a la pileta de curado, allí permanecen en inmersión hasta que se cumpla la fecha y hora de falla, es importante aclarar que el procedimiento de curado se realiza conforme a la NTC 1377 (2021).

Figura 26.
Muestras de concreto después de su periodo de curado.



Nota: Elaboración propia

Se logra evidenciar como la inclusión de mayor arcilla activada dentro de la mezcla de concreto, por medio de una de sus principales características que es la finura, disminuye hasta en un 0.5% el aire incluido dentro de la mezcla, esto podría garantizar un concreto más durable, ya que, al tener menor porcentaje de vacíos, las acciones del medio ambiente o agentes externos a una estructura de concreto, tendrían una disminución en su capacidad de afectación.

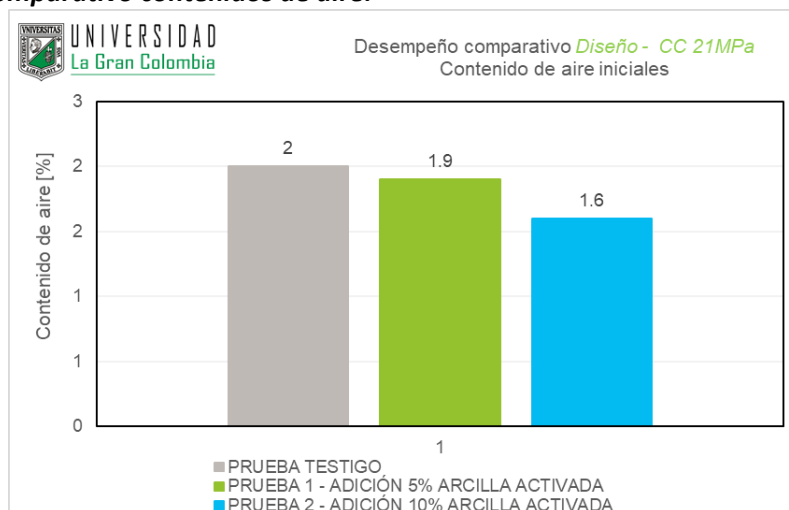
Como lo describe Matallana (2019), la durabilidad es una propiedad del concreto que se puede mejorar por medio de:

Su aumento está dado por la elaboración de mezclas con bajos contenidos de agua para disminuir la permeabilidad (baja relación agua – cemento), el empleo de aditivos (plastificantes, inclusores de aire), uso de materiales cementantes suplementarios

(puzolanas, escorias, metacaolín, cenizas) y de cementos especiales (resistentes a los sulfatos o a la reacción álcali sílice). (p. 28)

Figura 27.

Desempeño comparativo contenidos de aire.



Nota: Elaboración propia

La siguiente tabla, muestra el comportamiento de las tres mezclas de prueba con diferentes adiciones a las edades de 3, 7 y 28 días después de su elaboración.

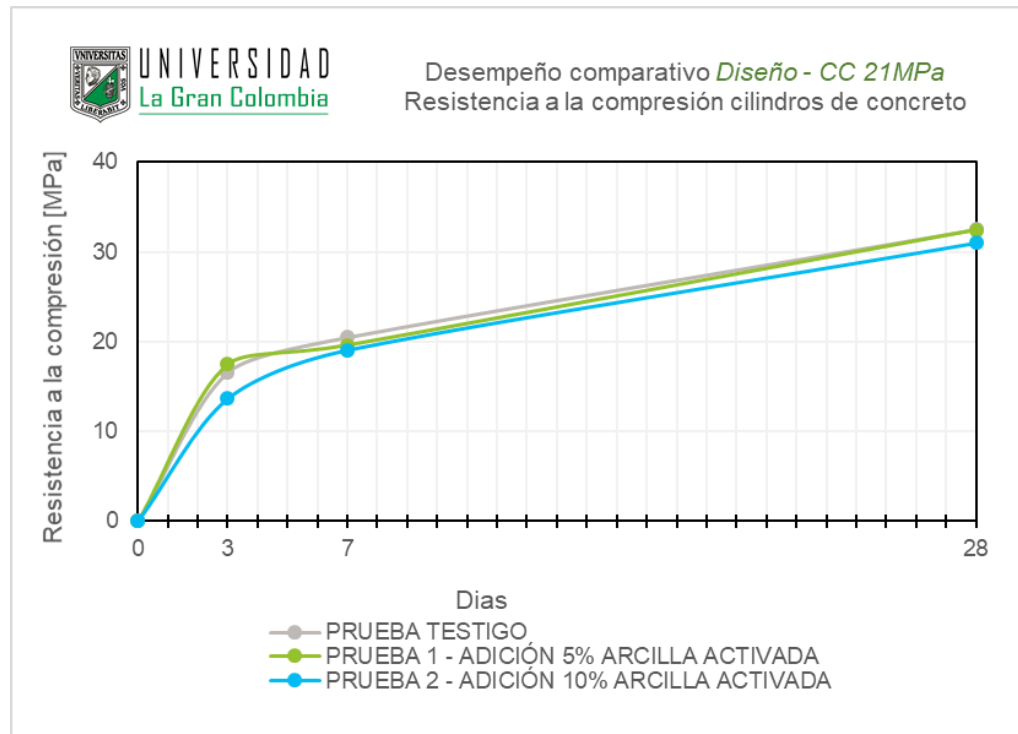
Tabla 21.

Resultados comparativos en estado endurecido.

Mezclas	Edad [Días]	Fecha de falla	Resistencia [MPa]	Resistencia [%]
PRUEBA TESTIGO	3	30/06/2024	16.57	78.9
	7	04/07/2024	20.47	97.5
	28	25/07/2024	32.48	154.7
PRUEBA 1 - ADICIÓN 5% ARCILLA ACTIVADA	3	30/06/2024	17.50	83.3
	7	04/07/2024	19.63	93.5
	28	25/07/2024	32.46	154.6
PRUEBA 2 - ADICIÓN 10% ARCILLA ACTIVADA	3	30/06/2024	13.67	65.1
	7	04/07/2024	19.06	90.8
	28	25/07/2024	30.99	147.6

Nota: Elaboración propia

Figura 28.
Desempeño comparativo de resistencias a la compresión.



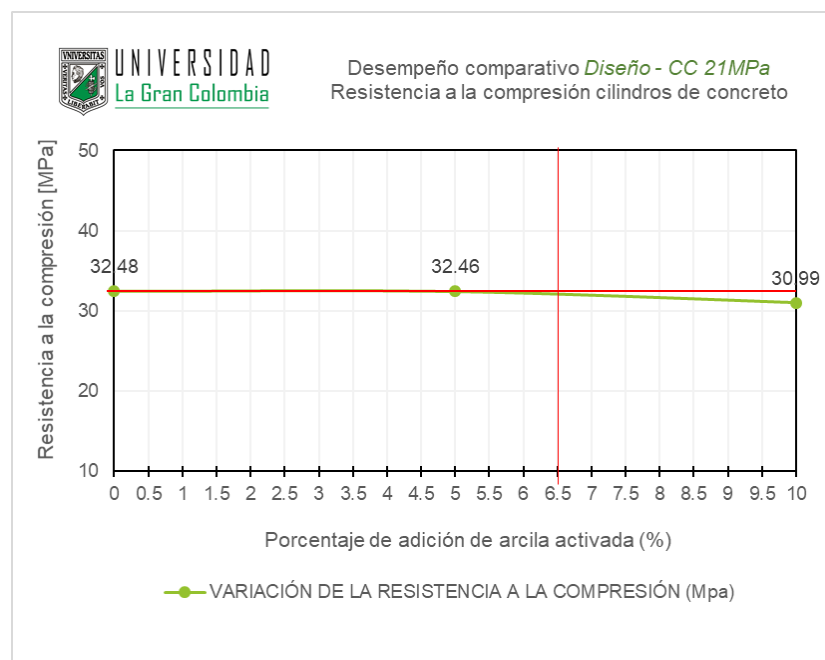
Nota: Elaboración propia

En la gráfica anterior, la prueba testigo y la prueba 1-Adición 5% Arcilla activada presentan un comportamiento similar desde las edades tempranas, que son 3 y 7 días, con una evolución de 78.3% a 3 días para la prueba testigo y un 83.3% para la prueba 1; la prueba 2-Adición 10% Arcilla activada a los 3 días presenta un comportamiento inferior, ya que, tiene una evolución del 65.1%.

A los 7 días, al igual que el comportamiento a los 3 días, la mezcla testigo y la adición del 5% de arcilla activada, presenta una evolución del 97.5% y 93.5% respectivamente, sin embargo, y a diferencia de la resistencia a los 3 días, la prueba 2 con 10% de arcilla activada presenta una evolución del 90.8%, esto representa el mayor porcentaje de evolución entre los 3 y 7 días de las 3 pruebas realizadas, esto debido a que la evolución fue de 25.7%, mientras que, las otras dos pruebas tuvieron evoluciones cercanas al 20%.

A los 28 días, la prueba testigo, la prueba 1 y la prueba 2 cumplieron con las resistencias esperadas del diseño, para la prueba testigo se alcanzó una resistencia de 32.48 MPa, para la prueba 1 32.46 MPa y para la prueba 2, 30.99 MPa, es importante resaltar que la adición del 5% de arcilla activada no represento ningún impacto en la resistencia a la compresión del concreto con respecto al testigo, mientras que la prueba 2, tuvo una disminución del -4.58% con respecto al testigo.

Figura 29.
Porcentaje óptimo de adición de arcilla activada.



Nota: Elaboración propia

Para establecer una dosis optima de inclusión de arcilla activada dentro de una mezcla de concreto y que esta no afecte las propiedades en estado fresco y endurecido, se realiza una interpolación tomando las resistencias a la compresión a los 28 días y los porcentajes de adición de cada prueba, esto define una curva decreciente la cual empieza en el 6.5% de adición, esta será el porcentaje óptimo de inclusión para garantizar un concreto que cumpla con la resistencia de diseño y la reología del concreto.

Análisis económico de la propuesta

Para definir el beneficio de incluir dentro de una mezcla de concreto una adición mineral, y brindar una propuesta técnico económica al mercado se realiza el siguiente análisis económico y se presenta el valor por m³ de concreto:

Tabla 22.

Análisis económico concreto testigo, 5% y 10% de arcilla activada.

Material	Valor Unitario (Kg)	PRUEBA TESTIGO	Valor para m ³	PRUEBA 1 - ADICIÓN 5% ARCILLA ACTIVADA	Valor para m ³	PRUEBA 2 - ADICIÓN 10% ARCILLA ACTIVADA	Valor para m ³
Cemento [kg]	\$ 550.00	335	\$ 184,250.00	318.25	\$ 175,037.50	301.5	\$ 165,825.00
Adición pulverizada [kg]	\$ 150.00	-	-	16.75	\$ 2,512.50	33.5	\$ 5,025.00
Grava 1 (19mm) [kg]	\$ 55.00	793	\$ 43,615.00	790	\$ 43,450.00	790	\$ 43,450.00
Arena 1 Trituración [kg]	\$ 55.00	935	\$ 51,425.00	930	\$ 51,150.00	923	\$ 50,765.00
Agua [lts]	\$ 4.00	185	\$ 740.00	185	\$ 740.00	185	\$ 740.00
		Total m ³	\$ 280,030.00	Total m ³	\$ 272,890.00	Total m ³	\$ 265,805.00

Nota: Elaboración propia

El costo para un metro cubico de concreto sin adición es de \$280,030 pesos colombianos, esto antes del IVA, para ese mismo metro cubico y con una adición de 5%, tiene un valor de \$272.890 pesos colombianos, lo que representa una disminución del 2.6%, y para una adición del 10% tiene un valor de \$265,805 pesos colombianos lo que representa un ahorro del 5.08%.

Sin embargo, el porcentaje óptimo de inclusión es del 6.5%, por lo que el análisis comparativo para dicho porcentaje es el siguiente:

Tabla 23.

Análisis económico concreto testigo y porcentaje óptimo de adición.

Material	Valor Unitario (Kg)	PRUEBA TESTIGO	Valor para m ³	% OPTIMO (6.5% ARCILLA ACTIVADA)	Valor para m ³
Cemento [kg]	\$ 550.00	335	\$ 184,250.00	313.22	\$ 172,271.00
Adición pulverizada [kg]	\$ 150.00	-	-	21.78	\$ 3,267.00
Grava 1 (19mm) [kg]	\$ 55.00	793	\$ 43,615.00	790	\$ 43,450.00
Arena 1 Trituración [kg]	\$ 55.00	935	\$ 51,425.00	930	\$ 51,150.00
Agua [lts]	\$ 4.00	185	\$ 740.00	185	\$ 740.00
		Total m ³	\$ 280,030.00	Total m ³	\$ 270,878.00

Nota: Elaboración propia

Conforme al análisis anterior, el ahorro con un porcentaje óptimo de 6.5% de arcilla activada, es del 3.27%. esto llevado a nivel industrial donde diariamente se producen 7.500 m³ de concreto en Bogotá, significa un ahorro de \$68,640,000 de pesos para la industria.

Conclusiones y Recomendaciones

El porcentaje óptimo de inclusión de arcilla activada de Nemocon sector pajarito para un concreto de 21 MPa es de 6.5%, el cual cumple con los requerimientos de resistencia y reología del concreto.

La arcilla activada es apta como adición mineral para el concreto, ya que, cuenta con 6.3% de caolinita, mineral necesario para la interacción química entre la portlandita del cemento y los Aluminatos de la arcilla activada y es el mineral más reactivo dentro del conjunto de minerales que componen la adición.

La molienda de la arcilla activada tiene un valor fundamental para el desarrollo del proyecto de grado, esto debido a que la finura determina el grado de hidratación de las partículas tanto de cemento como de adición mineral, y la compatibilidad física de estos dos materiales, por tal motivo, la adición probada es compatible físicamente con el cemento, ya que tiene una finura mayor al 92% de 45 μm .

De acuerdo con los resultados obtenidos para el concreto de 21 MPa a la edad de 28 días, se tiene que para un porcentaje de adición de 6.5% de arcilla activada, en estado endurecido, se llega al 100% de las resistencias con respecto a la prueba testigo; en estado fresco se logra identificar que a medida que aumenta el contenido de arcilla activada dentro de la mezcla, disminuye el contenido de aire y así mismo, disminuye de forma gradual la relación a/mc para un mismo asentamiento de salida.

Conforme a los resultados de resistencia a la compresión obtenidos en el laboratorio y la estadística de datos de producción obtenidos en la planta de HOLCIM puente aranda, se evidencia que la resistencia a compresión a los 28 días, se encuentra dentro de los rangos esperados, ya que, se encuentran entre los 32 MPa y 34 MPa.

Lista de Referencia o Bibliografía

1. Cáceres, V. I., Chaparro García, A. L. ., & Sánchez Molina, J. . (2022). *Caracterización de materiales arcillosos y su potencial aplicación en la industria cerámica*. editorial-ufps. Recuperado a partir de <https://libros.ufps.edu.co/index.php/editorial-ufps/catalog/book/23>
2. Talero Morales, R. (2020). *EL ROL DE LAS ARCILLAS ACTIVADAS TÉRMICAMENTE PARA EL ALCANCE DE LA NEUTRALIDAD MEDIOAMBIENTAL POR LA INDUSTRIA DEL CEMENTO*.
3. DANE. (2024). Estadística de concreto premezclado. Recuperado 4 de marzo de 2024, de <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/construccion/estadisticas-de-concreto-premezclado>
4. Pino, D., & Cáceres, F. (2021). Adición de arcilla calcinada al concreto estructural para mejorar propiedades físicas del concreto $f'c = 280$ y 350 kg/cm^2 , en la provincia de Puno - 2021 [Tesis de pregrado, Universidad Continental]. https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/12261/5/IV_FIN_105_TE_Pino_Huanca_2021.pdf
5. Nieto, H. (2018). Resistencia en concreto con cemento sustituido al 4 %, 6 % y 8 % por arcilla activada de Yacra – Huari. [Tesis de pregrado, Universidad San Pedro]. https://repositorio.usanpedro.edu.pe/bitstream/handle/USANPEDRO/5431/Tesis_56964.pdf?sequence=1&isAllowed=y
6. Guzman, D. (2001). Tecnología del Concreto y el Mortero (2001.a ed., Vol. 5) [Digital]. Bhandar Editores LTDA. (Obra original publicada 1984)

7. DynamisUMB. (2020, 27 noviembre). Las arcillas activadas y su potencial en la industria del cemento - Dynamis. Dynamis. <https://dynamis-br.com/las-arcillas-activadas-y-su-potencial-en-la-industria-del-cemento/#:~:text=La%20activaci%C3%B3n%20t%C3%A9rmica%20de%20arcillas,en%20la%20fabricaci%C3%B3n%20del%20cemento.>
8. Kosmatka, S., Kerkhoff, B., Panarese, W., & Tanesi, J. (2002). Diseño y control de mezclas de concreto (Decimocuarta) [Físico]. PCA.
9. Giraldo, O. (1987). *GUÍA PRÁCTICA PARA EL DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO*. UNAL.
10. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS (2021) Especificación de desempeño para cemento hidráulico.(NTC 121:2021). <https://tienda.icontec.org/gp-especificacion-de-desempeno-para-cemento-hidraulico-ntc121-2021.html>
11. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS (2022) Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico a la compresión, usando cubos de 50 mm o 2 pulgadas de lado. (NTC 220:2022). <https://tienda.icontec.org/gp-ntc-cementos-determinacion-de-la-resistencia-de-morteros-de-cemento-hidraulico-a-la-compresion-usando-cubos-de-50-mm-o-2-pulgadas-de-lado-ntc220-2022.html>
12. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS (2022) Método de ensayo para determinar el tiempo de fraguado del cemento hidráulico mediante aguja de vicat. (NTC 118:2022). <https://tienda.icontec.org/gp-ntc-cementos-metodo-de-ensayo-para-determinar-el-tiempo-de-fraguado-del-cemento-hidraulico-mediante-aguja-de-vicat-ntc118-2022.html>
13. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS (2018) Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos. (NTC 77:2018). <https://tienda.icontec.org/gp->

concretos-metodo-de-ensayo-para-el-analisis-por-tamizado-de-los-agregados-finos-y-gruesos-ntc77-2018.html

14. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS (2018) Especificaciones de los agregados para concreto. (NTC 174:2018). <https://tienda.icontec.org/gp-concretos-especificaciones-de-los-agregados-para-concreto-ntc174-2018.html>
15. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS (2024) Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto. (NTC 396:2024). <https://tienda.icontec.org/gp-ntc-metodo-de-ensayo-para-determinar-el-asentamiento-del-concreto-ntc396-2024.html>
16. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS (2013) Método de ensayo para determinar la temperatura del concreto fresco de cemento hidráulico. (NTC 3357:2013). <https://tienda.icontec.org/gp-concretos-metodo-de-ensayo-para-determinar-la-temperatura-del-concreto-fresco-de-cemento-hidraulico-ntc3357-2013.html>
17. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS (2013) Método de ensayo para la determinación del contenido de aire en el concreto fresco. Método de presión. (NTC 1032:2013). <https://tienda.icontec.org/sectores/servicios-organizacion-de-la-empresa-gestion-y-calidad-administracion-transporte-sociologia/servicios/gp-ingenieria-civil-y-arquitectura-metodo-de-ensayo-para-la-determinacion-del-contenido-de-aire-en-el-concreto-fresco-metodo-de-presion-ntc1032->
18. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS (2021) Método de ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto. (NTC 673:2021). <https://tienda.icontec.org/gp-concretos-metodo-de-ensayo-de-resistencia-a-la-compresion-de-especimenes-cilindricos-de-concreto-ntc673-2021.html>
19. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS (2021) Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos en el laboratorio. (NTC 1377:2021). <https://tienda.icontec.org/gp-ntc->

concretos-elaboracion-y-curado-de-especimenes-de-concreto-para-ensayos-en-el-laboratorio-
ntc1377-2021.html

20. El Acuerdo de París. (s. f.). United Nations Climate Change. Recuperado 22 de octubre de 2024, de <https://unfccc.int/es/acerca-de-las-ndc/el-acuerdo-de-paris>

Anexos

- Hoja de cálculo diseño de mezcla de concreto
- Plancha geológica 209