

**INFLUENCIA DEL REEMPLAZO PARCIAL DEL CEMENTO POR
MICROSÍLICE EN DIFERENTES PORCENTAJES SOBRE LA
TRABAJABILIDAD, LA RESISTENCIA Y LA
VIABILIDAD ECONÓMICA
DEL CONCRETO.**

Harold Esteban Ramírez Galindo

José Luis Martínez Ruiz

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

Miguel Antonio Caro

Ingeniero docente línea estructural



Universidad La Gran Colombia

Facultad de Arquitectura e Ingenierías

Programa de Ingeniería Civil

Bogotá DC

2026

Tabla de contenido

Resumen	6
Abstract	7
Introducción.....	8
Objetivos	9
Objetivo General	9
Objetivos Específicos	9
Marco Referencial	10
Aspectos Metodológicos	13
Caracterización de los agregados	14
Granulometría.....	14
Agregados gruesos.....	15
Agregados finos.....	18
Masa unitaria de los agregados	22
Masa unitaria suelta.....	22
Masa unitaria compactada.....	22
Masa unitaria vibrada.....	23
Densidad de los agregados	26
Densidad de agregados finos.....	26
Densidad de agregados gruesos.....	29
Densidad del cemento	31
Diseño de mezcla	32
Revenimiento y elaboración de cilindros	41

Resistencia a la compresión	46
Análisis y Discusión de Resultados	49
Trabajabilidad.....	50
Resistencia y esfuerzo a la compresión	51
Costos y precios	55
Conclusiones	59
Lista de Referencia o Bibliografía	61
Anexos	62

Lista de Tablas

Tabla 1 Principales compuestos del cemento después de la clinkerización.	11
Tabla 2 Análisis granulométrico agregado grueso	17
Tabla 3 Análisis granulométrico agregado fino.	18
Tabla 4 Datos de masa unitaria para agregado fino.	25
Tabla 5 Datos de masa unitaria para agregado grueso.	25
Tabla 6 Datos recolectados de la masa de agregados finos para cálculo de su densidad.....	29
Tabla 7 Datos recolectados de la masa de agregados gruesos para cálculo de su densidad.....	30
Tabla 8 Registro de volumen ocupado por las muestras de queroseno, y queroseno con cemento en el frasco Le Chatelier.....	32
Tabla 9 Cantidades de materiales necesarios para un metro cúbico de concreto.	40
Tabla 10 Cantidades de materiales necesarios para 12 cilindros de concreto.....	41
Tabla 11 Cantidades de microsílce de reemplazo según el porcentaje.	42
Tabla 12 Asentamiento de mezclas de concreto con reemplazo de microsílce.	44
Tabla 13 Carga máxima de las probetas de concreto a edades de 3, 7, 14 y 21 días.	48

Tabla 14 Reducción de la trabajabilidad en comparación con la muestra patrón.	51
Tabla 15 Esfuerzos promedio de concreto con reemplazó a edades de 3, 7, 14 y 28 días.	52
Tabla 16 Valores promedio, desviación estándar y coeficiente de varianza del esfuerzo máximo del concreto a los 14 días.	53
Tabla 17 Valores promedio, desviación estándar y coeficiente de varianza del esfuerzo máximo del concreto a los 14 días.	54
Tabla 18 Precio unitario de los materiales componentes del diseño de la mezcla de concreto y microsílce.	56
Tabla 19 Costos por metro cúbico de concreto según el diseño de mezcla.	56
Tabla 20 Aumento de costo por metro cuadrado de concreto y aumento de la resistencia del concreto respecto a la muestra patrón.	57

Lista de Figuras

Figura 1 Método de cuarteo en agregado grueso.	15
Figura 2 Distribución del agregado grueso.	16
Figura 3 Curva granulométrica de gravas.	17
Figura 4 Distribución de agregado fino.	18
Figura 5 Curva granulométrica de finos.....	19
Figura 6 Tipos e intervalos para la aceptación de agregados gruesos en mezclas de concreto. ...	20
Figura 7 Intervalos en la aceptación de agregados finos en mezclas de concreto.	20
Figura 8 Moldes para la determinación de la masa unitaria del agregado grueso y fino.	24
Figura 9 Material fino saturado superficialmente seco.	26
Figura 10 Picnómetro con muestra de agregado fino superficialmente seco, sumergido en agua.	28

Figura 11 Frasco de Le Chatetelier con solo queroseno y queroseno con cemento.....	31
Figura 12 Desviación estándar según el control de calidad en la elaboración de mezcla de concreto.	33
Figura 13 Peso del agua necesaria para un metro cúbico de concreto.	35
Figura 14 Resistencia media en función de la relación agua-cemento.	36
Figura 15 Volumen aparente del agregado en base al módulo de finura.	39
Figura 16 Ensayo de asentamiento o revenimiento en mezcla de concreto.	43
Figura 17 Medida en ensayo de asentamiento en muestras de concreto.	44
Figura 18 Cilindros de concreto en estado fresco.	46
Figura 19 Ensayo de compresión de cilindros de concreto.	47
Figura 20 Cilindro de concreto post-ensayo.	48
Figura 21 Resistencia máxima de las probetas de concreto a edades de 3, 7, 14 y 21 días.	49
Figura 22 Asentamiento o revenimiento en función del reemplazo de cemento por microsilíce.	50
Figura 23 Evolución de la resistencia promedio en las mezclas modificadas y la muestra patrón en días.....	52
Figura 24 Resistencia promedio y desviación estándar de las muestras de concreto con reemplazo de cemento por microsilíce a 28 días de edad.	55
Figura 25 Comparación entre los crecimientos del precio del concreto, aumento de la resistencia y aumento en el valor por unidad de resistencia.	58
Figura 26 Cotización realizada para 8 metros cúbicos de concreto en Bogotá, DC.	59

Resumen

La presente investigación estudia el reemplazo parcial del cemento Portland por microsilice en la optimización del desempeño del concreto, pensando en la necesidad de mejorar sus propiedades mecánicas sin alterar significativamente su trabajabilidad, ni generar costos excesivos. Mediante un estudio experimental bajo las Normas Técnicas Colombianas se realizó la caracterización de los materiales iniciando con el análisis granulométrico, masa unitaria de los agregados, y densidad de agregados y cemento con la finalidad de diseñar un patrón de mezcla, el cual se modificó con porcentajes de reemplazo de 5 %, 9 % y 12 % de cemento por microsilice. Posteriormente se evaluaron las mezclas de concreto en su comportamiento en estado fresco y endurecido con pruebas de asentamiento y resistencia a la compresión a diferentes edades, para finalizar se relacionaron los resultados obtenidos con un análisis económico de viabilidad de las mezclas. Los resultados demuestran que la incorporación de microsilice reduce progresivamente la trabajabilidad del concreto debido a su alta finura, por otra parte, manifiesta un incremento significativo de la resistencia a la compresión a edades avanzadas, destacándose la mezcla con 12 % de reemplazo con mejor desempeño mecánico. Si bien el uso de microsilice incrementa el costo de producción de concreto, los beneficios mecánicos que ofrece la posicionan como una alternativa viable para concretos de alto desempeño mecánico.

Palabras clave: Microsilice, concreto, resistencia a compresión, revenimiento, viabilidad económica, diseño de mezclas.

Abstract

This study examines the partial replacement of Portland cement with microsilica to optimize concrete performance, with a focus on improving its mechanical properties without significantly altering its workability or incurring excessive costs. Through an experimental study conducted in accordance with Colombian Technical Standards, the materials were characterized, beginning with granulometric analysis, unit weight of aggregates, and density of aggregates and cement, with the aim of designing a mix design, which was modified with replacement percentages of 5%, 9%, and 12% of cement with microsilica. Subsequently, the concrete mixtures were evaluated for their behavior in the fresh and hardened states, with slump and compressive strength tests at different ages. Finally, the results obtained were correlated with an economic feasibility analysis of the mixtures. The results demonstrate that the incorporation of microsilica progressively reduces the workability of the concrete due to its high fineness; on the other hand, it shows a significant increase in compressive strength at advanced ages, with the mixture with 12% replacement exhibiting the best mechanical performance. Although the use of microsilica increases the production cost of concrete, the mechanical benefits it offers position it as a viable alternative for high-performance concrete.

Keywords: Microsilica, concrete, compressive strength, cost-effectiveness, mix design.

Introducción

El concreto es uno de los materiales más utilizados en la construcción de obras de infraestructura debido a su resistencia, durabilidad y adaptabilidad a distintas condiciones estructurales. Su uso generalizado lo convierte en un elemento fundamental para el desarrollo urbano e industrial; sin embargo, su componente principal el cemento Portland representa un importante problema ambiental. La fabricación de este material genera elevadas emisiones de dióxido de carbono (CO_2), lo que contribuye de manera significativa al cambio climático y ha motivado la búsqueda de alternativas más sostenibles dentro del sector de la construcción.

En este contexto, la incorporación de materiales cementantes suplementarios surge como una estrategia viable para reducir el contenido de cemento en las mezclas de concreto sin comprometer su desempeño. Entre estas alternativas se encuentra la microsílíce, un subproducto de la industria del silicio metálico caracterizada por su alta finura y su elevado contenido de dióxido de silicio en estado amorfo. Diversas investigaciones han demostrado que la microsílíce puede mejorar la densificación de la matriz cementicia y aumentar la resistencia mecánica del concreto; no obstante, su uso también puede influir negativamente en la trabajabilidad de la mezcla fresca si no se emplea en proporciones adecuadas.

El presente trabajo de investigación se centra en evaluar la influencia del reemplazo parcial del cemento por microsílíce en el comportamiento del concreto, considerando tanto sus propiedades mecánicas como su desempeño en estado fresco y su viabilidad económica. Para ello se analizan diferentes porcentajes de sustitución los cuales serán: 0 %, 5 %, 9 % y 12 % con el fin de identificar las variaciones que se producen en la resistencia a la compresión y en la calidad general del material.

La metodología de la investigación contempla un enfoque experimental de laboratorio, mediante la elaboración de sondas cilíndricas de concreto sometidas a ensayos de resistencia a la compresión a distintas edades. Complementariamente, se realiza un análisis microestructural que permite relacionar las características internas del concreto con su comportamiento mecánico. Asimismo, se incorpora un análisis comparativo de costos para evaluar la factibilidad económica de la propuesta de sustitución.

Los resultados obtenidos permitirán establecer un porcentaje óptimo de reemplazo del cemento por microsílce, aportando criterios técnicos que contribuyan al diseño de concretos más eficientes, sostenibles y acordes con las necesidades actuales de la ingeniería civil.

Objetivos

Objetivo General

Evaluar la influencia del reemplazo parcial de cemento Portland por microsílce en diferentes concentraciones sobre la trabajabilidad, resistencia a la compresión y viabilidad económica en mezclas de concreto modificadas, con el fin de establecer su comportamiento en condiciones constructivas.

Objetivos Específicos

Diseñar y elaborar mezclas de concreto con reemplazos parciales de cemento por microsílce del 5 %, 9 % y 12 %, junto con una mezcla control como referencia.

Determinar el efecto de la microsílce sobre la trabajabilidad del concreto fresco mediante ensayos de revenimiento para cada dosificación.

Evaluar la evolución de la resistencia a compresión en distintas edades de curado, con el fin de caracterizar el comportamiento mecánico de cada mezcla.

Determinar la viabilidad técnica y económica de cada dosificación a partir de la relación entre costo de producción, resistencia obtenida y posibles aplicaciones constructivas

Marco Referencial

El microsílíce también conocido como humo de sílice es un subproducto de tipo ultrafino, es decir de granulometría de tipo muy fina, de espesor extremadamente delgado, este se obtiene como residuo de la industria metalúrgica, principalmente de la producción de aleaciones de silicio y ferrosilicio, este tiene en su mayoría a estar compuesto por Dióxido de silicio amorfo en porcentajes que van desde 85% al 98% (pureza) así como impurezas en el porcentaje restante que generalmente pueden ser de: Óxidos de Aluminio, Óxidos de hierro, Óxidos de Calcio y Óxidos de Magnesio, las cuales van a estar en forma de esferas sub micrométricas.

En sus propiedades físicas y químicas destaca como un material de granulometría muy fina, tanto que el tamaño de sus partículas llega a ser 100 veces más pequeña en comparación a la de cemento portland, siendo la de este de $15\mu\text{m}$ a comparación de la de microsílíce la cual es de $0,15\mu\text{m}$, a su vez presenta una densidad real (peso específico) de 2200 kg/m^3 a 2300 kg/m^3 , y una densidad aparente de 200 kg/m^3 a 700 kg/m^3 .

Este subproducto de la industria metalúrgica ha sido sujeto de investigación y uso en la industria de concretos en la ingeniería civil, esto debido a su comportamiento positivo en los concretos donde vienen una serie de procesos físicos y químicos con su adición, los cuales dan como resultado en aspectos como la trabajabilidad, la durabilidad, aumento de la resistencia y control de la expansión entre otros.

La composición del cemento está formada por Clinker y Yeso, donde de acuerdo a sus fases y dosificaciones sus propiedades pueden variar entre ellas como lo puede ser la resistencia, por tal motivo es que se debe requerir una identificación de estas fases.

En la composición del Clinker se encuentran en forma de óxidos:

Calcio (Ca) $\Rightarrow$ Óxido de Calcio o Cal (CaO)

Sílice (Si) $\Rightarrow$ Dióxido de Sílice o Silicato (SiO₂)

Aluminio (Al) $\Rightarrow$ Óxido de Aluminio o Aluminato (Al₂O₃)

Hierro (Fe) $\Rightarrow$ Óxido de Hierro (Fe₂O₃)

Estos óxidos mediante el proceso de clinkerización son transformados a productos más complejos de obtener dando por resultado en los principales compuestos del cemento:

Tabla 1

Principales compuestos del cemento después de la clinkerización.

Nombre	Fórmula	Abreviatura
Silicato tricálcico	3CaO•SiO ₂	C ₃ S
Silicato dicálcico	2CaO• SiO ₂	C ₂ S
Aluminato tricálcico	3CaO• Al ₂ O ₃	C ₃ A
Ferroaluminato tetracálcico	4CaO• Al ₂ O ₃ • Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

Fuente: Argos 360 en concreto

En este punto ya se comienza a hablar de fases del cemento

Alita (C₃S): Sería la fase principal compuesta por silicato tricálcico la cual representa entre el 50% al 70% del Clinker, donde tiene la función del inicio del fraguado, así como las resistencias tempranas.

Belita (C₂S): En comparación con la alita tiene un bajo calor de hidratación, compuesta por silicato dicálcico y constituye entre el 15% y el 30% del Clinker, contribuyendo a la resistencia desde el día 7.

Celita(C₃A): Compuesta por el aluminato tricálcico que genera alto calor de hidratación (5% 10% del Clinker).

Felita (C₄AF): Compone entre el 5% y el 15% del Clinker es el encargado de la reducción de temperatura durante la clinkerización.

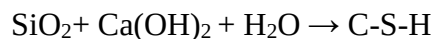
Cuando se agrega microsilice conocido con el nombre técnico de Dióxido de silicio amorfo (SiO₂) tiende a ser altamente reactivo y debido a esto y a el tamaño de sus partículas ultrafinas se acelera el proceso de reacción con el hidróxido de calcio producido por la hidratación del cemento, estas pequeñas partículas tienen la capacidad de penetrar el espacio entre partículas del cemento facilitando su adhesión para una mezcla más homogénea.

El proceso químico consiste en que una vez el cemento entra en un periodo de hidratación para realizar el diseño de mezcla, sus componentes principales, el silicato tricálcico (C₃S) y el silicato dicálcico (C₂S) generan:

(C₃S) y (C₂S) $\Rightarrow$ Gel de CSH Silicato de calcio hidratado (El cual va a ser responsable de la resistencia).

(C₃S) y (C₂S) $\Rightarrow$ Hidróxido de calcio C_a(OH)₂ (Portlandita).

Cuando se agrega la microsilice da inicio a una reacción puzolánica, la cual es un proceso químico a temperatura ambiente, donde materiales silíceos (puzolanas) que, debido a su alta reactividad, reaccionan con el hidróxido de calcio, el cual es liberado por el cemento durante de la hidratación:



Esto quiere decir que la microsilice consume el hidróxido de calcio dando como resultado el gel (C-S-H) Silicato de calcio hidratado el proporciona la resistencia para el diseño de mezcla.

En la presente investigación, desarrollada en la Facultad de Ingenierías, se adoptó un enfoque cuantitativo, dado que el objetivo principal consiste en medir y analizar variables físicas estructurales bajo parámetros técnicos verificables. El estudio se centra en la modificación de un diseño de mezcla, mediante la incorporación de microsilíce en diferentes porcentajes de sustitución con el propósito de evaluar el comportamiento del concreto a partir de ensayos realizados en laboratorio.

Para la investigación se tomaron en cuenta como base de punto de partida referencias y documentos de tipo académico sobre experimentos de influencia de la microsilíce en concreto, donde se encuentran investigaciones de diferentes pruebas variando el porcentaje de microsilíce (0%, 5%, 10% y 15%) trabajando en concreto de alta resistencia y evaluando su aporte en la durabilidad, permeabilidad y otras propiedades mecánicas enfocados principalmente en la resistencia a la compresión los cuales se encuentran debidamente referenciados tanto en anexos como en la bibliografía.

Así mismo la evaluación de las propiedades mecánicas dependerán de pruebas de laboratorio como por ejemplo a un ensayo de la resistencia a la compresión evaluadas a diferentes etapas de duración de curado en agua (sumergimiento): a los 7, 14 y 21 días respectivamente para así evaluar la variación de sus parámetros de propiedades mecánicas respecto al tiempo de curado en agua bajo los lineamientos y especificaciones de la NTC.

Los materiales usados para el respectivo diseño de mezcla, debieron pasar por un proceso de análisis granulométrico y tamizado para la selección de agregados finos y gruesos usando la normativa técnica colombiana 174.

Aspectos Metodológicos

La investigación tuvo un enfoque cuantitativo y experimental, enfocado en los criterios y requisitos necesarios para diseñar una mezcla de 240 kg/cm^2 y centrado en el comportamiento en estado fresco y endurecido del concreto cuando se reemplaza parcialmente el cemento por microsilice. De manera aplicada y bajo los criterios de las Normas Técnicas Colombianas (NTC), la investigación comenzó con la caracterización física y mecánica de cada uno de los materiales que componen el concreto, para realizar correctamente el diseño de la mezcla y posteriormente someterlo a modificaciones con microsilice y realizar las pruebas de revenimiento y compresión.

Caracterización de los agregados

Granulometría

La NTC 174 establece los lineamientos para el análisis granulométrico y de gradación de los agregados gruesos y finos que serán empleados en la elaboración de concreto estructural. Para este análisis, se emplearon 2.4 kg de agregado grueso y aproximadamente 800 g de agregado fino; además, se usaron instrumentos como balanza de precisión y una serie de tamices por los cuales se hacen pasar los agregados, estos serán detallados más adelante, cabe aclarar que el análisis granulométrico se desarrolla en tres pasos encadenados.

Porcentaje retenido individual: se calcula para cada tamiz dividiendo la masa retenida en este entre la masa total de la muestra, expresando el resultado en porcentaje. Esto indica qué fracción del material quedó retenida en cada tamiz.

Porcentaje retenido acumulado: se obtiene sumando progresivamente los porcentajes retenidos desde el tamiz de mayor abertura hasta el que se analiza. Esto refleja cuánto del material ha sido retenido hasta llegar a cada tamiz.

Porcentaje que pasa: se obtiene restando el porcentaje acumulado de 100. Indica qué proporción del material es suficientemente fina como para atravesar cada tamiz, y es precisamente el que se grafica en la curva granulométrica.

Agregados gruesos.

Los agregados gruesos son materiales granulares o pétreos son de origen natural o artificial, y cuyas partículas son en su mayoría, son retenidas en el tamiz N.º 4 (4,75 mm de abertura). La gradación de estos agregados comenzó con la selección de la muestra mediante el método de cuarteo, el cual consiste en que el material se distribuye en una superficie plana formando un montículo homogéneo, que luego se divide en cuatro partes iguales, donde finalmente se tomaron dos porciones opuestas en diagonal para conformar la muestra representativa.

El cuarteo garantiza que la muestra refleje la distribución de tamaños representativa, minimizando el riesgo de segregación; es decir, que las partículas más grandes o más pequeñas queden sobrerrepresentadas por azar.

Figura 1

Método de cuarteo en agregado grueso.



Fuente: Elaboración propia

Luego, el material seleccionado se hizo pasar por una secuencia de tamices dispuestos en el siguiente orden de abertura: 1", 3/4", 1/2", 3/8", N.º 4 y N.º 8. Posteriormente se registro el contenido retenido en cada tamiz.

Figura 2

Distribución del agregado grueso.



Fuente: Elaboración propia.

Seguidamente, con los valores obtenidos se calculó el porcentaje retenido, retenido acumulado y porcentaje que pasa cada tamiz, para luego realizar la curva granulométrica, la cual relaciona el tamaño de apertura de cada tamiz con el porcentaje que pasa dicho tamiz para de esta manera verificar si la distribución granulométrica se ajusta a las franjas de gradación establecidas en la NTC 174, y asegurar que el material es apto para su uso en concreto estructural.

Tabla 2

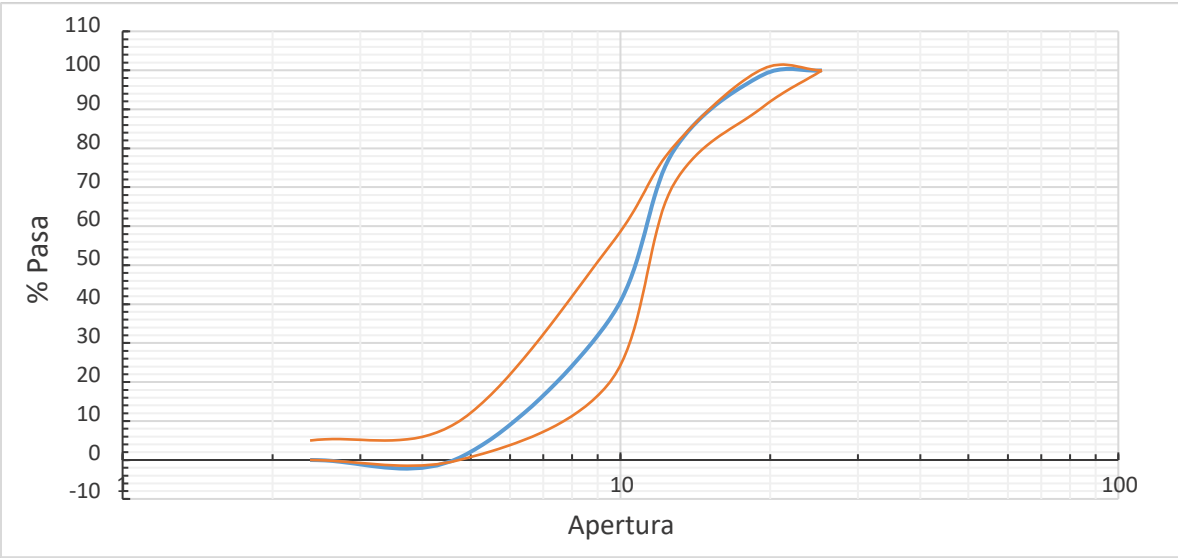
Análisis granulométrico agregado grueso

Agregado Grueso					
Apertura	Tamiz	Masa	% Retenido		
(mm)		Retenida (g)		acumulado	%Pasa
25,4	1"	0	0,00	0,00	100,00
19,05	3/4"	37,3	1,57	1,57	98,43
12,7	1/2"	468,8	19,68	21,25	78,75
9,525	3/8"	1013,5	42,55	63,79	36,21
4,75	N°4	848,6	35,62	99,42	0,58
2,38	N8°	13,9	0,58	100,00	0,00
Suma		2382,1	100,00		

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3

Curva granulométrica de gravas.



Fuente: Elaboración propia.

Agregados finos.

Los agregados finos son partículas de arena natural o triturada que, en su mayoría, pasan el tamiz N.º 4 pero quedan atrapadas antes de cruzar el tamiz N.º 200. Al igual que con el agregado grueso, la selección de la muestra se realizó mediante el método de cuarteo, garantizando la representatividad del material antes de someterlo al tamizado. La muestra resultante se hizo pasar por la siguiente serie de tamices de abertura progresivamente menor: N.º 4, N.º 8, N.º 16, N.º 30, N.º 50, N.º 100 y N.º 200.

Tabla 3

Análisis granulométrico agregado fino.

Agregado Fino					
Apertura (mm)	Tamiz	Masa Retenida (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	%Pasa
4.75	Nº4	57.1	07.06	07.06	92.94
2.38	Nº8	91.5	11.31	18.38	81.62
1.19	Nº16	99.1	12.25	30.63	69.37
595	Nº30	176.9	21.87	52.50	47.50
297	Nº50	247.1	30.56	83.06	16.94
149	Nº100	96.8	11.97	95.03	4.97
74	Nº200	27.6	3.41	98.44	1.56
	Fondo	12.6	1.56	100.00	0.00
ma		808.7	100.00		

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4

Distribución de agregado fino.

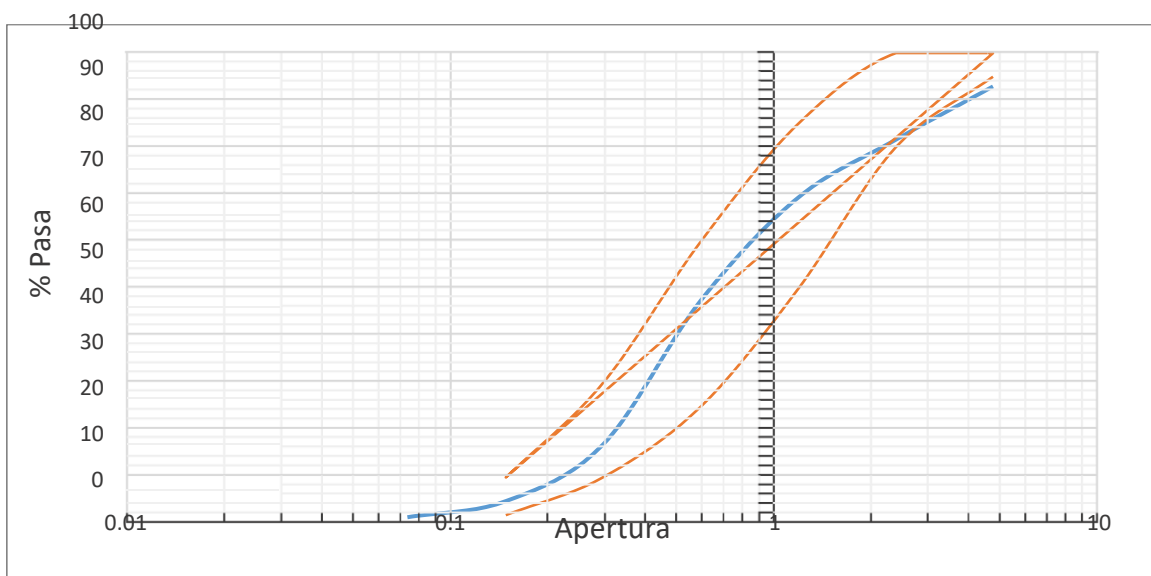


Fuente: Elaboración propia.

Con los porcentajes de material pasante calculados para cada tamiz, se procedió igualmente que con el agregado grueso se debe trasladar esos valores a una curva granulométrica.

Figura 5

Curva granulométrica de finos.



Fuente: Elaboración propia

Figura 6

Tipos e intervalos para la aceptación de agregados gruesos en mezclas de concreto.

Número del tamaño del agregado	Tamaño nominal (tamices de abertura cuadrada)	Material que pasa uno de los siguientes tamices (porcentaje en masa)												
		100 mm	90 mm	75 mm	63 mm	50 mm	37,5 mm	25,0 mm	19,0 mm	12,5 mm	9,5 mm	4,75 mm (No.4)	2,36 mm (No.8)	1,18 mm (No.16)
1	90 mm a 37,5 mm	100	90-100	-	25- 60	-	0-15	-	0-5	-	-	-	-	-
2	63 mm a 37,5 mm	-	-	100	90-100	35-70	0-15	-	0-5	-	-	-	-	-
3	50 mm a 25,0 mm	-	-	-	100	90-100	35-70	0-15	-	0- 5	-	-	-	-
357	50 mm a 4,75 mm (No.4)	-	-	-	100	95-100	-	35-70	-	10-30	-	0- 5	-	-
4	37,5 mm a 19,0 mm	-	-	-	-	100	90-100	20-55	0-15	-	0- 5	-	-	-
467	37,5 mm a 4,75 mm (No.4)	-	-	-	-	100	95-100	-	35-70	-	10- 30	0- 5	-	-
5	25,0 mm a 12,5 mm	-	-	-	-	-	100	90-100	20-55	0- 10	0- 5	-	-	-
56	25,0 mm a 9,5 mm	-	-	-	-	-	100	90-100	40- 85	10-40	0- 15	0- 5	-	-
57	25,0 mm a 4,75 mm (No.4)	-	-	-	-	-	100	95-100	-	25-60	-	0-10	0- 5	-
6	19,0 mm a 9,5 mm	-	-	-	-	-	100	90-100	20- 55	0- 15	0- 5	-	-	-
67	19,0 mm a 4,75 mm (No.4)	-	-	-	-	-	-	100	90-100	-	20- 55	0- 10	0- 5	-
7	12,5 mm a 4,75 mm (No.4)	-	-	-	-	-	-	-	100	90- 100	40- 70	0- 15	0- 5	-
8	9,5 mm a 2,36 mm (No.8)	-	-	-	-	-	-	-	-	100	85- 100	10- 30	0- 10	0- 5

Fuente: NTC 174

Figura 7

Intervalos en la aceptación de agregados finos en mezclas de concreto.

Tamaño de la malla	Porcentaje que pasa en peso
9.52 mm (3/8")	100
4.75 mm (No.4)	95 a 100
2.36 mm (No.8)	80 a 100
1.18 mm (No.16)	50 a 85
0.60 mm (No.30)	25 a 60
0.30 mm (No.50)	10 a 30
0.15 mm (No.100)	2 a 10

Fuente: NTC 174

Al comparar las curvas granulométricas de ambos agregados con las gradaciones definidas en la NTC 174, se establece que el agregado fino se ajusta correctamente a los parámetros exigidos por la norma, mientras que el agregado grueso se clasifica como tamaño nominal tipo 67, una designación que corresponde a un material con partículas que predominan entre 3/4" y el tamiz N.º 4. En consecuencia, ambos agregados cumplen para su uso en mezclas de concreto estructural.

Con la gradación de los agregados verificada, se debe tener en cuenta el módulo de finura (MF) del agregado fino. El MF es un parámetro adicional que indica la distribución granulométrica del agregado fino. Para su cálculo se sumaron los porcentajes acumulados retenidos en los tamices N.º 4, N.º 8, N.º 16, N.º 30, N.º 50 y N.º 100, y el resultado se divide entre 100.

$$MF = \frac{\sum(\% \text{ retenidos en tamices N.º 4, 8, 16, 30, 50 y 100})}{100}$$

$$MF = \frac{7.06 + 18.4 + 30.6 + 52.5 + 83.1 + 95}{100} = 2.87$$

Un MF de 2.87 señala una arena de granulometría media con ligera tendencia al lado grueso, la NTC 174 establece que el módulo de finura de los agregados finos destinados a concreto debe situarse aproximadamente entre 2,3 y 3,1. Para un valor de 2,87, el agregado analizado se ubica dentro de ese intervalo, próximo al límite superior, pero sin rebasarlo, lo que confirma su uso para ser incorporado en mezclas de concreto.

Masa unitaria de los agregados

La masa unitaria hace referencia a la cantidad de material por unidad de volumen, dada la geometría granular irregular de los agregados, siempre quedan espacios entre las partículas que no se encuentran ocupados por el material, estos se conocen como vacíos. La NTC 92 regula los ensayos para la determinación de la masa unitaria bajo tres condiciones de llenado del molde: estado suelto, compactado y vibrado. Cada una de estas producen condiciones de alojamiento diferentes entre las partículas, lo que significa valores distintos de masa unitaria.

La norma establece también los materiales requeridos los cuales serán: una balanza de precisión, un cucharón o pala de llenado, una varilla de apisonamiento para la condición compactada y molde metálico cuyo volumen interno debe ser conocido para determinar la masa unitaria. Se debe aclarar que según si se trabaja con agregado fino o grueso el molde debe ser diferente en cuanto a sus dimensiones, además la norma recomienda usar una cantidad de material entre el 125 % y el 200 % del volumen necesario para llenar el molde correspondiente, esto con el fin de garantizar material suficiente para un llenado correcto.

Masa unitaria suelta.

En esta condición el agregado tanto grueso como el fino se debe verter en caída libre desde una altura de 5 cm sobre la apertura del molde, permitiendo que las partículas se acomoden sin alterarse. Una vez llenado el molde, se debe enrasar la superficie del molde sin ejercer presión. Después de eso se registró el peso del molde con el material granular, este proceso se realizó dos veces, tanto en el agregado fino como en el grueso.

Masa unitaria compactada.

Esta condición busca reproducir un estado de mayor densidad en los agregados mediante la compactación manual. La norma establece que se debe realizar el llenado del molde en tres capas

iguales, en cada capa se debe nivelar ligeramente la superficie del material y luego aplicar 25 golpes con la varilla distribuidos de manera uniforme en cada capa. Una vez llenado el molde se debe enrasar la superficie retirando el material sobrante en busca de generar un acabado plano a ras del molde, luego se debe pesar el molde con el agregado. Este proceso también se realizó dos veces en para cada agregado, fino y grueso.

Masa unitaria vibrada.

Al igual que con la condición compactada, se debe llenar el molde en tres capas iguales con la diferencia de que no se debe usar la varilla, en cambio, en cada capa se debe levantar alternativamente los lados opuestos del molde hasta aproximadamente 5 cm de altura y dejarlo caer sobre una superficie firme, se debe repetir esto hasta completar 50 golpes por capa. Esto con el objetivo de replicar el efecto de la vibración mecánica, los impactos sucesivos generan desplazamientos en las partículas, permitiendo que se reacomoden en posiciones de mayor estabilidad y menor volumen de vacíos. Una vez completadas las tres capas, se enrasa la superficie a ras del molde, se retira el material sobrante para finalmente proceder con el pesaje del conjunto formado por el molde y el agregado. Este proceso solo se realizó dos veces para el agregado fino.

Figura 8

Moldes para la determinación de la masa unitaria del agregado grueso y fino.



Fuente: Elaboración propia.

La masa unitaria se obtiene dividiendo el peso de la muestra sin contar el peso del molde entre el volumen interno del molde, de cada condición se debe hacer un promedio para obtener un dato aproximado.

Tabla 4*Datos de masa unitaria para agregado fino.*

Agregado Fino		
Volumen del recipiente: 2812 cm³	Peso (g)	Peso unitario (kg/m³)
Suelto	4152	1483,64
	4192	
Compactado	4654	1661,45
	4690	
Vibrado	4742	1687,94
	4751	

*Fuente: Elaboración propia***Tabla 5***Datos de masa unitaria para agregado grueso.*

Agregado Grueso		
Volumen del recipiente: 14020 cm³	Peso (g)	Peso unitario (kg/m³)
Suelto	23160	1659,06
	23360	
Compactado	24080	1715,05
	24010	

Fuente: Elaboración propia

Densidad de los agregados

Densidad de agregados finos.

La NTC 237 establece que para determinar la densidad del agregado fino primero es necesario llevar la muestra a una condición saturada superficialmente seca (SSS), “en este estado” los poros internos de las partículas están llenos de agua, pero la superficie exterior se encuentra seca. El ensayo estipula el procedimiento para alcanzar y verificar esta condición, además de los instrumentos necesarios para determinar la densidad del agregado fino, como: el molde troncocónico invertido, un pistón de apisonamiento, una balanza de precisión, un picnómetro y un horno.

Figura 9

Material fino saturado superficialmente seco.



Nota: En la imagen se aprecian el molde troncocónico invertido y el pistón de apisonamiento.

Fuente: Elaboración propia.

La prueba consiste en dejar una muestra de agregado fino sumergida en agua durante 24 horas, para luego dejarla secar y escurrir el agua hasta que no se observe agua en su superficie ni una alta cohesión en las partículas, luego para verificar la condición SSS se debe colocar el molde troncocónico invertido sobre una superficie lisa, rígida y no absorbente, introducir el agregado fino de manera suelta hasta formar un pequeño montículo por encima del borde y aplicar 25 caídas del pistón desde aproximadamente 5 mm de altura, distribuyendo los golpes uniformemente para lograr una compactación ligera y homogénea. Una vez realizado este proceso, el molde se debe levantar verticalmente con cuidado y se observa el comportamiento del material: si el agregado mantiene la forma cónica, aún conserva humedad superficial excesiva; por otro lado, si experimenta un ligero asentamiento o colapso parcial, se ha alcanzado la condición SSS, lo que indica que la película de agua superficial ha desaparecido y que las partículas siguen saturadas internamente.

A continuación, se debe procedió a llenar parcialmente el picnómetro con agua para luego introducir aproximadamente 500 g del agregado fino en condición SSS, posteriormente se agito y giro el picnómetro en busca de retirar cualquier burbuja que pudiera haber quedado atrapada. Una vez hecho eso, se registró la masa total del picnómetro con agua y la muestra de agregado fino en conjunto.

Figura 10

Picnómetro con muestra de agregado fino superficialmente seco, sumergido en agua.



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, el agregado fino se retiró totalmente del picnómetro y se llevó a secado en un horno a 100 °C hasta que el agua se evaporó y se alcanzó una masa constante. Posteriormente se dejó enfriar la muestra en temperatura ambiente para poder registrar su masa seca y calcular la densidad del agregado teniendo en cuenta el volumen desplazado por el mismo en el picnómetro.

La densidad relativa del agregado fino se determina mediante la siguiente expresión:

$$D_{\text{af}} = \frac{m_{\text{af}}}{m_{\text{w}}}$$

◆ +

S —

◆◆

Donde:

D_s = densidad del agregado fino

A = masa de la muestra seca (g)

B = masa del picnómetro lleno con agua (g)

S = masa de la muestra en condición SSD (g)

do = masa del picnómetro con muestra y agua (g)

Tabla 6

Datos recolectados de la masa de agregados finos para cálculo de su densidad.

Agregado Fino	
Masa secada en horno (g)	492,6
Masa del conjunto (g)	963,2
Masa SSS (g)	500,1
Picnómetro solo con agua (g)	654,1

Fuente: Elaboración propia.

$$D_{\diamond} = \frac{492.6}{645.1 + 500.1 - 963.2} = 2.58$$

Densidad de agregados gruesos.

La NTC 176 regula el procedimiento para determinar la densidad del agregado grueso, además, sigue una metodología similar a la del agregado fino, adaptada a una muestra de mayor masa y tamaño. La muestra de agregado grueso se debe sumergir en agua durante 24 horas para saturar los poros del agregado, “transcurrido ese tiempo”, se debe retirar y secar superficialmente

de manera manual con ayuda de un textil o papel adsorbente, hasta alcanzar la condición SSS, para luego medir la masa de la muestra de agregado, seguidamente, la muestra se sumerge nuevamente en agua para medir su masa sumergida; finalmente, se lleva al horno hasta alcanzar una masa constante, luego se deja enfriar a temperatura ambiente y se registra su masa seca. Con las tres masas obtenidas la SSS, sumergida y seca, la densidad relativa se calculó como:

$$D_s = \frac{A}{B - A}$$

Donde:

D_s = densidad del agregado grueso

A = masa de la muestra SSS (g)

B = masa de la muestra saturada y sumergida (g)

Tabla 7

Datos recolectados de la masa de agregados gruesos para cálculo de su densidad.

Agregado Grueso	
Masa secada en horno (g)	6388
Masa sumergida (g)	3984,4
Masa saturada (g)	6661,4

Fuente: Elaboración propia

Densidad del cemento

La NTC 221 establece los lineamientos para la determinación de la densidad del cemento, para este ensayo se utilizó aproximadamente 65 g de cemento hidráulico gris de uso general, marca Argos. Además, en cuanto a instrumentos se empleó: un frasco Le Chatelier, queroseno, y una balanza de precisión. El procedimiento inicia con el llenado del frasco Le Chatelier con queroseno hasta un nivel entre las marcas de 0 y 1 mL, y se registra este nivel como la lectura inicial. Seguidamente, se añaden aproximadamente 65 g de cemento cuidadosamente, evitando pérdidas de material. Luego se debe agitar suavemente el frasco en busca de eliminar las burbujas de aire que pudieran estar atrapadas y se registra la lectura final del volumen desplazado por el cemento.

Figura 11

Frasco de Le Chatelier con solo queroseno y queroseno con cemento.



Fuente: Elaboración propia

La diferencia entre ambas lecturas corresponde al volumen ocupado por las partículas de cemento, a partir de la cual se calcula su densidad:

Tabla 8

Registro de volumen ocupado por las muestras de queroseno, y queroseno con cemento en el frasco Le Chatelier.

Volumen (mL)	
Lectura inicial	0,9
Lectura final	22,1
Diferencia	21,2

Fuente: Elaboración propia

El cálculo de la densidad será:

$$\rho = \frac{64.5}{21.2} = 3.042 \text{ kg/dm}^3$$

Diseño de mezcla

El método ACI determina el proporcionamiento del cemento, agregado fino, agregado grueso y agua en relación a la resistencia a la compresión requerida y la trabajabilidad esperada en la mezcla. En ese orden de ideas, se diseñó una mezcla con una resistencia específica de 240 kg/cm², con un asentamiento de aproximadamente 200 mm, el método también solicita definir qué tipo de control de calidad se tendrá para la mezcla, para este diseño se empleó un control de calidad bueno.

Las propiedades de los materiales empleados se resumen a continuación:

- **Cemento:** Portland marca Argos

- **Agregado grueso:** Tamaño máximo nominal de 25 mm, peso volumétrico de 1611 kg/m³ y densidad de 2.66 g/cm³

- **Agregado fino:** Módulo de finura de 2.87, peso volumétrico de 1687 kg/m³ y densidad de 2.58 g/cm³

Como se mencionó anteriormente, el método ACI obliga a ajustar la resistencia de diseño a una resistencia promedio requerida, superior a la especificada, para que, de este modo, las medidas menos favorables sigan cumpliendo con los requisitos mínimos. Esto está ligado al control de calidad de la muestra, por lo que se diseña en un margen de seguridad estadístico desde el comienzo.

Figura 12

Desviación estándar según el control de calidad en la elaboración de mezcla de concreto.

TIPO DE CONTROL	DESVIACION ESTANDAR (σ)
<i>Muy bueno</i>	<i>0.07 fm</i>
<i>Bueno</i>	<i>0.14 fm</i>
<i>Regular</i>	<i>0.21 fm</i>
<i>Deficiente</i>	<i>0.28 fm</i>

Fuente: Manual de prácticas de laboratorio de concreto.

Según la tabla, para un concreto de $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$, considerando un control de calidad bueno, la tabla dictamina una desviación estándar de $\sigma = 0,14 \text{ fm}$, por lo que la resistencia promedio requerida se calcula despejando la siguiente expresión para un 5 % de muestras que no alcancen la resistencia especificada:

$$f'_{cr} = f'_{cs} - 1.65 \sigma$$

Reemplazando los valores en la expresión:

$$f'_{ci} = f_{ci} - 1.65 * 0.14$$

$$f_{ci}$$

$$f'_{ci} = f_{ci} - 0.231$$

$$f_{ci}$$

$$f'_{ci} = 0.769$$

$$f_{ci}$$

Por lo tanto, la resistencia promedio requerida de diseño es:

$$f_{ci} = \frac{f'_{ci}}{0.769} = \frac{240}{0.769} = 313 \text{ MPa}$$

Lo siguiente es consultar la tabla de contenido de agua y aire atrapado del método ACI 211, teniendo en cuenta el tamaño máximo nominal del agregado grueso de 25 mm y un asentamiento de 180 mm.

Figura 13

Peso del agua necesaria para un metro cúbico de concreto.

Agua en l/m ³ para el tamaño nominal máximo indicado								
Asentamiento (mm)	9,5 mm	12,5 mm	19 mm	25 mm	37,5 mm	50 mm	75 mm	150 mm
Concreto sin entrada de aire								
25 a 50	208,1	199,2	187,3	178,4	163,5	154,6	130,8	113,0
75 a 100	228,9	217,0	202,2	193,2	178,4	169,5	145,7	124,9
150 a 175	243,8	229,0	214,1	202,2	187,3	178,4	160,5	-
Más de 175	-	-	-	-	-	-	-	-
Cantidad aproximada de aire en mezcla (%)	3	2,5	2	1,5	1	0,5	0,3	0,2

Fuente: Adaptado de ACI (2002).

Revenimiento	Cantidad de agua							
	(Kg/m³ de concreto para agregados de tamaño máximo)							
(mm)	10 mm	12.5 mm	20 mm	25 mm	40 mm	50 mm	70 mm	150 mm
30 a 50	205	200	185	180	160	155	145	125
80 a 100	225	215	200	195	175	170	160	140
150 a 180	240	230	210	205	185	180	170	¾
Contenido de aire atrapado (porcentaje)	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	0.3	0.2

Fuente: Manual de prácticas de laboratorio de concreto.

La tabla señala que se debe tener un contenido de agua de 205 kg por metro cúbico de concreto, y estima una cantidad de aire atrapado de 1.5 %, ahora lo que sigue es determinar la relación de agua y cemento (a/c), que se obtiene consultando la gráfica publicada en Propiedades

del Concreto de Neville (2018, p. 27), referenciando la resistencia promedio requerida de $f'_m = 311,5 \text{ kg/cm}^2$.

Figura 14

Relación a/c de acuerdo a la resistencia promedio requerida estimada a 28 días

Resistencia a la compresión a los 28 días (MPa)	Relación a/c (ACI)	Relación a/c (ASOCRETO)
42	0,41	-
35	0,48	0,40
28	0,57	0,47
21	0,68	0,57
14	0,82	0,72

Fuente: Diseño de mezclas de concreto aplicando el método ACI. (27).

El valor de $311,5 \text{ kg/cm}^2$ equivalente a $30,54 \text{ Mpa}$ se ubica en el texto de Diseño de mezclas de concreto aplicando el método ACI donde, se establece que hay una ecuación para el respectivo cálculo de valores que no aparece en la tabla la cual es:

$$\frac{f'_{ci} - f'_{ci}}{a / f'_{ci} - f'_{ci}} = \frac{f'_{ci} - f'_{ci}}{a / f'_{ci} - f'_{ci}}$$

Donde:

a/c_i = Relación a hallar

a/c_{max} = Relación extremo superior

a/c_{min} = Relación extremo inferior

f'_{ci} = Valor de resistencia a hallar (Mpa)

f'_{cmax} = Valor de resistencia extremo superior (Mpa)

f'_{cmin} = Valor de resistencia extremo inferior (Mpa)

Reemplazando:

$$\frac{f'_{ci} - f'_{cm}}{f'_{cm} - f'_{cm}} = \frac{a/f'_{cm} - a/f'_{cm}}{a/f'_{cm} - a/f'_{cm}}$$

$$\frac{a}{f'_{cm}} - \frac{a}{f'_{cm}}$$

$$\frac{a}{f'_{cm}}$$

Resistencia a la compresión a los 28 días (MPa)	Relación a/c (ACI)	Relación a/c (ASOCRETO)
42	0,41	-
35	0,48	0,40
28	0,57	0,47
21	0,68	0,57
14	0,82	0,72

Fuente: Diseño de mezclas de concreto aplicando el método ACI. (27).

Donde:

Se toman los datos mas cercanos

$f'_{cmax}=35 \text{ Mpa} \rightarrow (a/c) \text{ Max}=0,48$

$f'_{cmin}=28 \text{ Mpa} \rightarrow (a/c) \text{ Min} = 0,57$

Reemplazando:

$$\frac{35 - 30,5}{0,48 - \frac{a}{f'_{cm}}} = \frac{35 - 28}{0,48 - 0,57}$$

Resolviendo:

$$\frac{4,5}{0,48 - \frac{a}{f'_{cm}}} = \frac{7}{-0,09}$$

$$\frac{4,5}{0,48 - \frac{a}{f'_{cm}}} = \frac{7}{-0,09}$$

Igualando:

$$\frac{4,5}{0,48 - \frac{a}{c}i} = -77,78$$

Despejando:

$$4,5 = -77,78 \cdot (0,48 - (a/c) i)$$

$$4,5 = -37,33 + 77,78(a/c) \quad i$$

$$4,5 + 37,33 = 77,78(a/c) \quad i$$

$$41,83 = 77,78$$

Resultado final:

$$(a/c)i = \frac{41,83}{77,78} = 0,538$$

Con la relación a/c definida en 0.54, el contenido de cemento se obtiene despejando directamente:

$$\begin{array}{rcl}
 P \text{ } \diamond \diamond \diamond \diamond \diamond \diamond \diamond & & P \text{ } \diamond \diamond \diamond \diamond \\
 \diamond \diamond \diamond \diamond \diamond \diamond \diamond \diamond = & & \frac{\diamond \diamond \diamond \diamond a}{\diamond \diamond \diamond a} \\
 & & 0.54 \\
 & & 205 \\
 P \text{ } \diamond \diamond \diamond \diamond \diamond \diamond \diamond & & \diamond \diamond = 380 \diamond \diamond \\
 \diamond \diamond \diamond \diamond \diamond \diamond \diamond \diamond = & & \frac{\quad}{0.54}
 \end{array}$$

Ahora bien, para hallar el volumen aparente del agregado grueso se determina consultando la siguiente tabla, teniendo en cuenta el módulo de finura del agregado fino de 2.87, y el tamaño máximo nominal del agregado grueso de 25 mm:

Figura 15

Volumen aparente del agregado en base al módulo de finura.

Tamaño máximo del agregado	Volumen de agregado grueso compactado con varilla , por volumen de concreto para módulo de finura de la arena de:			
(mm)	2.40	2.60	2.80	3.00
10	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5	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
70	0.82	0.80	0.78	0.76
150	0.87	0.85	0.83	0.81

Fuente: Manual de prácticas de laboratorio de concreto

Este valor indica que el agregado grueso ocupará el 66 % del volumen por metro cúbico de concreto, medido en términos de su masa unitaria. Por esto, el volumen aparente y posteriormente la masa del grueso agregado se calculan como:

$$P_{\text{agregado grueso}} =$$

$$\text{Volumen aparente} =$$

$$0.66 * \rho_a$$

$$\rho_{ia}$$

$$P_{\text{microsilice}} = \frac{V_{\text{microsilice}}}{V_{\text{microsilice}} + V_{\text{cement}}}$$

$$V_{\text{microsilice}} =$$

$$0.66 * 1687 \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$P_{\text{microsilice}} =$$

$$V_{\text{microsilice}} =$$

$$V_{\text{microsilice}} = 1013 \text{ kg}$$

Con los valores obtenidos, se calculan los volúmenes efectivos que cada componente ocupa dentro de un metro cúbico de concreto, dividiendo la masa de cada material entre su densidad respectiva, teniendo esto en cuenta, se prosigue con el cálculo de los volúmenes efectivos del resto de componentes dentro de un metro cúbico de concreto, dividiendo el peso de cada material entre su densidad respectiva:

$$\frac{P_{\text{microsilice}}}{D_{\text{microsilice}}} = \frac{380 \text{ kg}}{3042 \text{ kg/m}^3} = 0.125 \text{ m}^3$$

$$\frac{P_{\text{arena}}}{D_{\text{arena}}} = \frac{205 \text{ kg}}{1000 \text{ kg/m}^3} = 0.205 \text{ m}^3$$

$$\frac{P_{\text{grava}}}{D_{\text{grava}}} = \frac{1013 \text{ kg}}{2660 \text{ kg/m}^3} = 0.381 \text{ m}^3$$

$$\frac{D_{50} \times 100}{D_{50} \times 100 + D_{50} \times 100} = \frac{D_{50} \times 100}{D_{50} \times 100 + D_{50} \times 100}$$

$$0,15 \text{ m}^3 \text{ ai} = 15 \% * 1$$

$$0,15^3 = 0,015 \text{ m}^3$$

$$0,381 + 0,015 \text{ m}^3 = (1 \text{ m}^3 - (0,125 + 0,205 + 0,381 + 0,015) \text{ m}^3) = 0,274 \text{ m}^3$$

La masa del agregado fino se calcula multiplicando su volumen efectivo por su densidad:

$$P = 0,274 \text{ m}^3 * 2580 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} = 707 \text{ Kg}$$

La siguiente tabla resume las proporciones de materiales necesarios para producir 1 m³ de concreto según la dosificación obtenida:

Tabla 9

Cantidades de materiales necesarios para un metro cúbico de concreto.

<i>Material</i>	<i>Volumen neto (m³)</i>	<i>Peso (Kg)</i>
<i>Cemento</i>	<i>0,125</i>	<i>380</i>
<i>Agregado fino</i>	<i>0,274</i>	<i>707</i>
<i>Agregado grueso</i>	<i>0,381</i>	<i>1013</i>
<i>Agua</i>	<i>0,205</i>	<i>205</i>

<i>Aire atrapado</i>	<i>0,015</i>	<i>0</i>
----------------------	--------------	----------

Fuente: Elaboración propia

Revenimiento y elaboración de cilindros

Con el diseño de mezcla y la dosificación definida, se procedió a la fabricación de las probetas de concreto siguiendo los lineamientos de la NTC 550. Esta norma establece que se debe hacer un mínimo de tres cilindros para cada edad de ensayo, considerando cuatro edades de evaluación, por esto se requirieron 12 cilindros de concreto por mezcla modificada, elaborados en moldes de 4" x 8".

Tabla 10

Cantidades de materiales necesarios para 12 cilindros de concreto.

Volumen Requerido (m³)		0,0221
Material	Volumen neto (m³)	Peso (Kg)
Cemento	0,00276	8,38
Agregado fino	0,00604	15,59
Agregado grueso	0,00840	22,34
Agua	0,00452	4,52
Aire atrapado	0,00033	0

Fuente: Elaboración propia

La metodología experimental contempló la elaboración de cuatro tipos de mezcla, todas derivadas del mismo diseño base de concreto. La variable de estudio fue el porcentaje de reemplazo parcial de cemento por microsilice, evaluado en tres niveles (5 %, 9 % y 12 %) más una mezcla patrón sin reemplazo, que actuó como referencia para cuantificar el efecto real de la sustitución sobre el comportamiento mecánico del concreto. Siguiendo la metodología, se realizó la elaboración de cuatro tipos de mezcla, de los cuales tres son derivados del mismo diseño de

concreto preestablecido. Lo que diferencia o varía en las mezclas es el reemplazo parcial de cemento por microsilíce en distintos porcentajes de 5 %, 9 % y 12 %. Además de una mezcla patrón sin reemplazo, que actúa como referencia para medir el efecto real de la sustitución

Tabla 11

Cantidades de microsilíce de reemplazo según el porcentaje.

Mezcla	Reemplazo	Reemplazo de cemento por microsilíce (Kg)
M1	5 %	0,419
M2	9 %	0,754
M3	12 %	1,006

Fuente: Elaboración propia

La mezcla patrón cumple el rol de línea base: sin ella, cualquier variación observada en resistencia carecería de un punto de comparación objetivo. Es el equivalente al grupo de control en un experimento clínico. La trabajabilidad del concreto fresco se evaluó mediante el ensayo de revenimiento, ejecutado conforme a la NTC 396 y utilizando el clásico cono de Abrams. El procedimiento es el siguiente: el cono se coloca sobre una superficie rígida, limpia y no absorbente, asegurándolo firmemente para evitar desplazamientos durante el llenado. A continuación, se llena en tres capas aproximadamente iguales, compactando cada una con 25 golpes de varilla distribuidos uniformemente.

Figura 16

Ensayo de asentamiento o revenimiento en mezcla de concreto.



Fuente: Elaboración propia

Una vez completado el llenado, se enrasó la superficie superior y se retiró el material derramado alrededor de la base posterior a esto, el cono se levantó verticalmente de forma lenta y uniforme, permitiendo que el concreto se asentara por acción de su propio peso. La diferencia entre la altura original del molde (300 mm) y la altura final del concreto asentado corresponde al valor de revenimiento, cuanto mayor sea esta diferencia, más fluida y trabajable es la mezcla. El procedimiento se repitió cuatro veces, una por cada concentración de microsílce evaluada, permitiendo comparar directamente cómo la sustitución parcial de cemento afecta la trabajabilidad del concreto fresco.

Figura 17

Medida en ensayo de asentamiento en muestras de concreto.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 12

Asentamiento de mezclas de concreto con reemplazo de microsílíce.

Mezcla	Reemplazo	Revenimiento (mm)
Patrón	0 %	245
M1	5 %	228
M2	9 %	210

M3	12 %	195
----	------	-----

Fuente: Elaboración propia

La elaboración de los cilindros se realizó conforme a la NTC 550, llenando cada molde en dos capas de igual volumen y compactando cada una con 25 golpes de varilla, distribuidos uniformemente sobre la superficie. Una vez completado el llenado, se enrasó la superficie superior y se identificaron los especímenes para su trazabilidad. Los cilindros recién moldeados se dejaron en reposo durante las primeras 24 horas, en condiciones controladas y protegidas de la pérdida de humedad, una etapa crítica, pues el concreto en este período es especialmente vulnerable: la hidratación del cemento apenas comienza y cualquier perturbación mecánica o pérdida de agua puede comprometer irreversiblemente la microestructura que está formándose.

Figura 18

Cilindros de concreto en estado fresco.



Fuente: Elaboración propia

Transcurridas las primeras 24 horas, los especímenes fueron desmoldados y trasladados a un estado de curado en agua, donde permanecieron sumergidos hasta alcanzar cada edad de ensayo. Este proceso no es un mero protocolo: el curado húmedo garantiza que la hidratación del cemento continúe de manera sostenida, desarrollando progresivamente la red de silicatos responsable de la resistencia del concreto. Por cada mezcla se elaboraron total de 12 cilindros, distribuidos en cuatro edades de evaluación, lo que permite rastrear no solo la resistencia final del concreto, sino su evolución en el tiempo en función del porcentaje de reemplazo con microsílize.

Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión se evaluó siguiendo los lineamientos de la NTC 673, norma que regula el ensayo de compresión axial sobre especímenes cilíndricos, el ensayo mecánico más fundamental del concreto. Antes de iniciar la prueba, los cilindros fueron retirados del curado, limpiados y verificados dimensionalmente. A continuación, se colocaron de una manera centrada

en la máquina de compresión, alineando su eje longitudinal con la dirección de aplicación de la carga.

Figura 19

Ensayo de compresión de cilindros de concreto.



Fuente: Elaboración propia

La carga se aplicó de forma continua y creciente, sin impactos, a la velocidad controlada estipulada por la NTC 673, hasta provocar la falla del espécimen. Durante el ensayo se registró la carga máxima soportada, a partir de la cual se calcula la resistencia a la compresión.

Figura 20

Cilindro de concreto post-ensayo.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13

Carga máxima de las probetas de concreto a edades de 3, 7, 14 y 21 días.

Edad	Carga máxima en (kN)			
	Control	5%	9%	12%
3 días	9,7	9,3	9,5	9,5
	13,2	13	13,1	13,2
7 días	13,3	13,1	13,1	13,1
	52,7	44,2	43,2	46,9
14 días	50,4	43,2	45,9	45,5
	53,2	40,7	45,8	48,4
	59,6	63,3	56,4	80,1
28 días	67,7	64,1	64,1	70
	55,6	58,1	72,1	82,5

Fuente: Elaboración propia.

La resistencia máxima a la compresión se define como la relación entre la carga máxima soportada por el cilindro y su área transversal: Este valor permite comparar directamente el desempeño de cada mezcla en función de la edad de ensayo y el porcentaje de reemplazo por microsílce, constituyendo el indicador central para evaluar el efecto de la sustitución parcial de cemento sobre el comportamiento mecánico del concreto.

Figura 21

Resistencia máxima de las probetas de concreto a edades de 3, 7, 14 y 21 días.

Edad	Resistencia (kN/m ²)			
	Control	5%	9%	12%
3 días	50,37	48,30	49,34	49,34
	68,55	67,51	68,03	68,55
7 días	69,07	68,03	68,03	68,03
	273,69	229,54	224,35	243,57
14 días	261,74	224,35	238,37	236,29
	276,28	211,37	237,85	251,36
	309,52	328,74	292,90	415,98
28 días	351,59	332,89	332,89	363,53
	288,75	301,73	374,44	428,45

Fuente: Elaboración propia.

Análisis y Discusión de Resultados

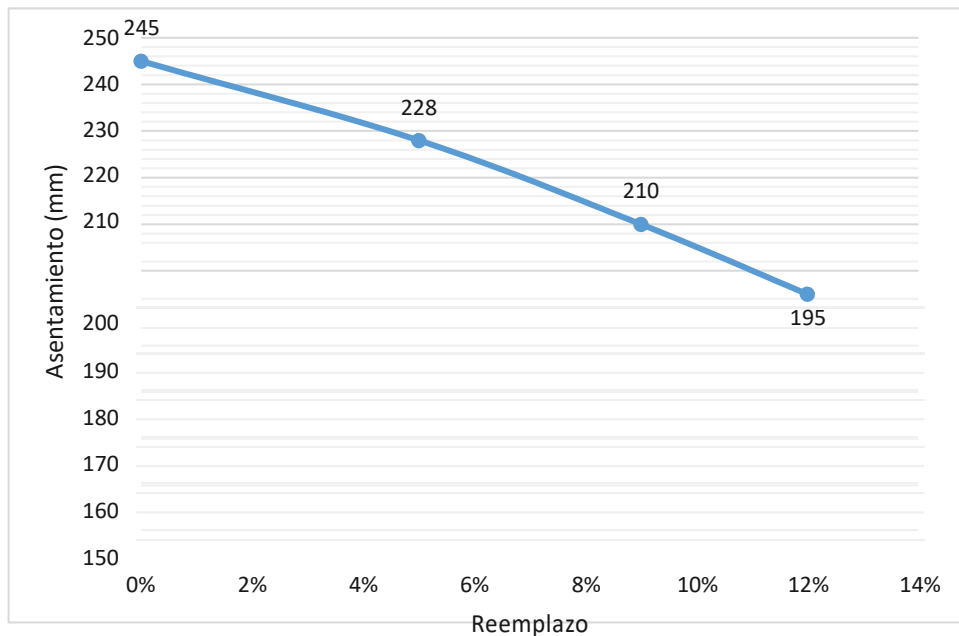
A continuación, se muestran y examinan los resultados de la fase experimental, con el fin de probar la influencia del microsílce en las propiedades del concreto tanto en estado fresco como endurecido.

Trabajabilidad

Dado los resultados evidenciados en la prueba de revenimiento, se evidencia la disminución progresiva en la trabajabilidad en las mezclas modificadas con reemplazo de cemento por microsílíce.

Figura 22

Asentamiento o revenimiento en función del reemplazo de cemento por microsílíce.



Fuente: Elaboración propia.

Se observa que la mezcla patrón presentó un mayor revenimiento con 245 mm, mientras que como era esperado, la mezcla de 12 % de reemplazo obtuvo el menor valor de revenimiento con 195 mm, lo cual representa una reducción de poco más del 20 % comparado con la mezcla patrón, esto quiere decir que la adición de microsílíce modifica el comportamiento reológico de la mezcla. Este comportamiento es esperable, y se explica debido al incremento de superficie total de los sólidos resultado de las partículas ultrafinas del microsílíce las cuales son aproximadamente

100 veces más finas que un grano de cemento, esto se traduce en la reducción de agua disponible que confiera fluidez a la mezcla.

Tabla 14

Reducción de la trabajabilidad en comparación con la muestra patrón.

Mezcla	Reemplazo	Reducción trabajabilidad
		6,94%
M1	5 %	14,29%
M2	9 %	20,41%
M3	12 %	

Fuente: Elaboración propia.

Resistencia y esfuerzo a la compresión

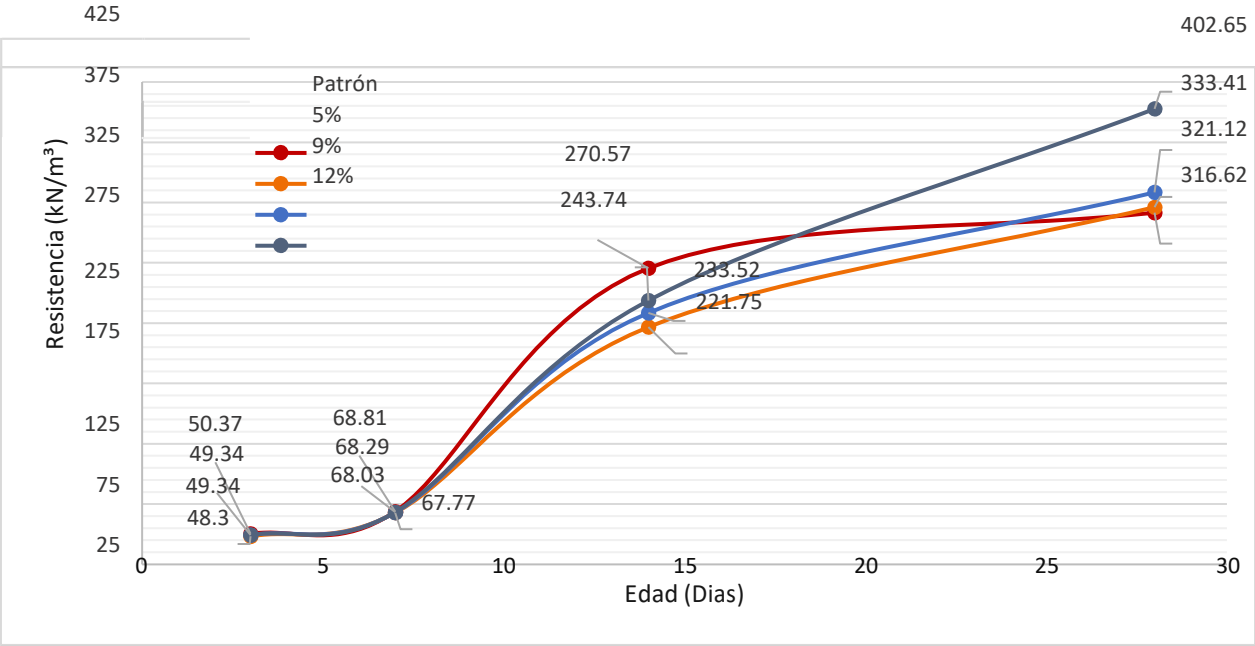
Las pruebas de compresión demostraron que, a edades tempranas de 3 y 7 días, las cuatro mezclas demostraron resistencias similares, esto se explica debido al comportamiento puzolánico; la microsílce no reacciona inmediatamente con el cemento, la reacción se presenta cuanto la hidratación produce suficiente hidróxido de calcio para iniciar dicha reacción.

A la edad de 14 días se presentó una leve disminución de resistencia en las mezclas con reemplazo en comparación con la muestra patrón, principalmente en la mezcla con 5 % de reemplazo. Esto podría ser un indicio de que la sustitución parcial de cemento reduce la disponibilidad de hidratación, por lo que la reacción puzolánica no alcanza aún su estado pleno para compensar la disminución de cemento. No obstante, la situación cambia de manera drástica a los 28 días de edad; las mezclas con reemplazo de microsílce superan en resistencia a la muestra patrón, en donde se destaca principalmente la mezcla con 12 % de reemplazo registrando la mayor resistencia de todas. Esto se debe al resultado de dos factores: la reacción puzolánica, que genera silicato de calcio hidratado adicional usando hidróxido de calcio libre, y el efecto de las partículas

de microsílice que disminuyen los vacíos de la mezcla, densificando la matriz del concreto, dando como resultado un concreto más compacto y resistente con el tiempo.

Figura 23

Evolución de la resistencia promedio en las mezclas modificadas y la muestra patrón en días.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15

Esfuerzos promedio de concreto con reemplazó a edades de 3, 7, 14 y 28 días.

Edad	Esfuerzo Promedio (kg/cm²)			
	Control	5%	9%	12%
3 días	50,37	48,30	49,34	49,34
7 días	68,81	67,77	68,03	68,29
14 días	270,57	221,75	233,52	243,74
28 días	316,62	321,12	333,41	402,65

Fuente: Elaboración propia.

Desde este punto se procedió a someter los resultados del ensayo a compresión a un análisis estadístico, mediante el cálculo de la desviación estándar y el coeficiente de variación (CV), para así poder medir y evaluar la dispersión y confiabilidad de los datos obtenidos en laboratorio en cada dosificación. En este sentido, se observa que a los 14 días de edad los coeficientes de variación se mantienen por debajo del 5% en todas las mezclas, lo que estadísticamente sugiere un buen nivel de homogeneidad en los datos.

Tabla 16

Valores promedio, desviación estándar y coeficiente de varianza del esfuerzo máximo del concreto a los 14 días.

14 días			
Mezcla	Promedio	Desviación Estándar	Coeficiente de varianza (%)
Patrón	270,57	7,76	2,87
5 %	221,75	9,36	4,22
9 %	233,52	7,95	3,40
12 %	243,74	7,53	3,09

Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, continuando con la edad 28 días los datos muestran un comportamiento más heterogéneo; La mezcla con 9 % de microsilice presenta mayor dispersión que las demás dosificaciones, esto sugiere que a esta edad el comportamiento puede ser más impredecible, o es posiblemente por variaciones en la distribución de microsilice dentro de la matriz cementante durante el mezclado. No obstante, la mayoría de las mezclas presentan CV inferiores al 10 %, umbral que en ensayos de concreto se considera aceptable dada la naturaleza heterogénea del material. Particularmente se destaca el caso de la mezcla con 12 % de reemplazo; a pesar de ser la que mayor resistencia alcanza, mantiene un CV de 8,63 %, lo que indica que su desempeño superior

no es un dato atípico aislado, sino de un comportamiento relativamente consistente entre los tres cilindros ensayados.

Tabla 17

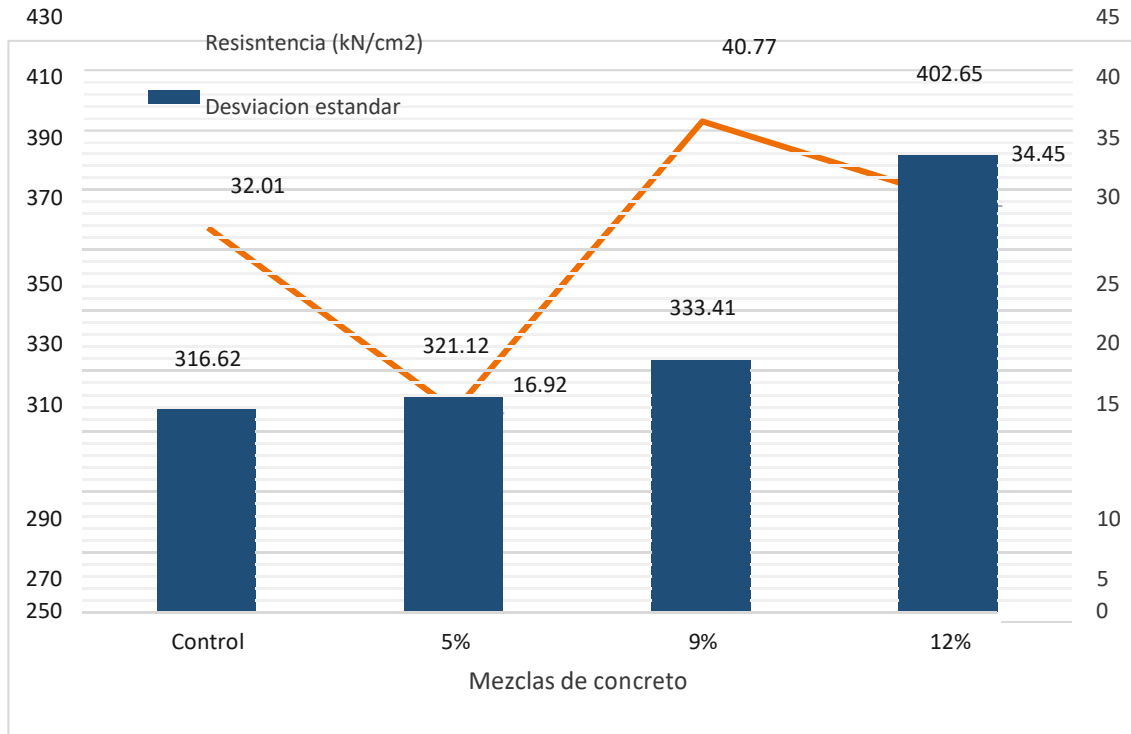
Valores promedio, desviación estándar y coeficiente de varianza del esfuerzo máximo del concreto a los 14 días.

28 días			
Mezcla	Promedio	Desviación Estándar	Coeficiente de varianza (%)
Patrón	316,62	32,01	10,11
5 %	321,12	16,92	5,27
9 %	333,41	40,77	12,23
12 %	402,65	34,45	8,56

Fuente: Elaboración propia.

Figura 24

Resistencia promedio y desviación estándar de las muestras de concreto con reemplazo de cemento por microsílize a 28 días de edad.



Fuente: Elaboración propia.

Costos y precios

La viabilidad económica de cada mezcla es un factor determinante y de alta relevancia para la implementación en obra, es por eso que se calculó el costo por metro cúbico de concreto para cada mezcla, considerando los precios unitarios de los materiales constitutivos del concreto, esto usando los precios vigentes en el primer semestre del año 2026. Posteriormente se relacionaron los costos asociados al concreto con la resistencia máxima a la edad de 28 días alcanzada por cada mezcla, esta relación expresa el costo necesario por cada unidad de resistencia en kg/cm² para cada mezcla.

Tabla 18

Precio unitario de los materiales componentes del diseño de la mezcla de concreto y microsilíce.

Material	Peso por m³ (kg)	Valor por kg
Cemento	380	\$690
Agregado fino	707	\$128
Agregado grueso	1013	\$102
Agua	205	\$3
<i>Microsilíce</i>		\$7.000

Fuente: Elaboración propia.

Este parámetro integra ambas variables en un único indicador que señala cuál de las dosificaciones ofrece la mejor relación entre el desempeño mecánico y el costo de la producción. A menor valor de relación o índice de costo-resistencia es mayor la eficiencia económica de la mezcla, lo que se traduce en que la inversión rinde más en términos de resistencia. Estos resultados evidencian una tendencia esperada, en la construcción un concreto de mayor desempeño mecánico conlleva un costo mayor. Si bien el incremento de la resistencia del microsilíce aumenta significativamente, también encarece la mezcla, dado que el microsilíce presenta un precio unitario considerablemente superior al del cemento convencional

Tabla 19

Costos por metro cúbico de concreto según el diseño de mezcla.

Mezcla	Precio por metro cúbico	Resistencia kg/cm²	Relación Costo-Resistencia
	\$457.233	316,62	
Patrón	\$577.123	321,12	\$1.444
5 %	\$673.035	333,41	\$1.797
9 %	\$776.433	402,65	\$2.019
12 %			\$1.928

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados señalan que a medida en que aumenta el porcentaje de reemplazo de cemento por microsilíce, también aumenta el costo por metro cúbico. Además, el incremento en el costo no es una mejora proporcional al aumento en la resistencia mecánica, lo que significa que se paga progresivamente para ganar menos resistencia.

Tabla 20

Aumento de costo por metro cuadrado de concreto y aumento de la resistencia del concreto respecto a la muestra patrón.

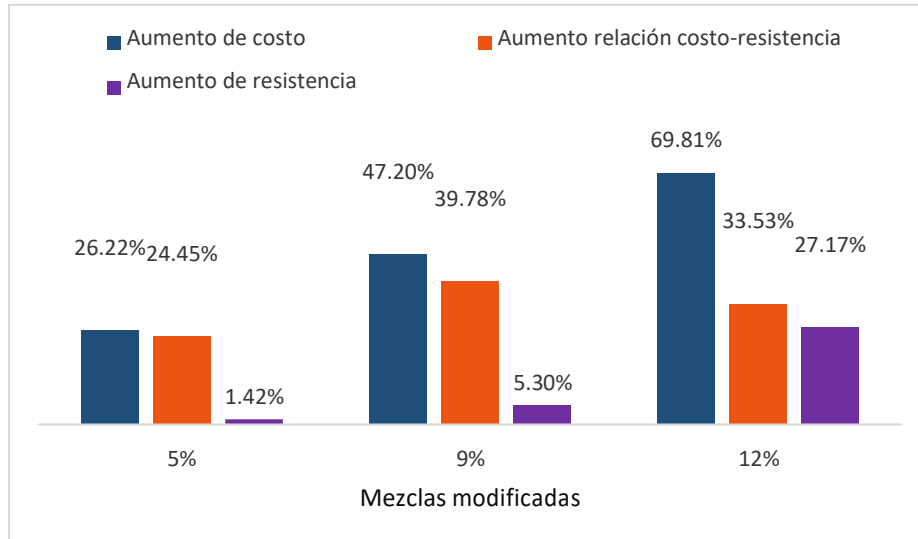
Reemplazo	Aumento de costo	Aumento relación costo-resistencia	Aumento de resistencia
5 %	26,22%	24,45%	1,42%
9 %	47,20%	39,78%	5,30%
12 %	69,81%	33,53%	27,17%

Fuente: Elaboración propia.

Ahora bien, para los reemplazos del 5 % y 9 %, los incrementos de los costos llegaron a 26,22 % y 47.2 % respectivamente, sin aumentos significativos en la resistencia mecánica que justifique el sobre costo. Algo diferente ocurre con el reemplazo del 12 %, que, aunque representa el mayor incremento en el costo, también presenta la mayor y significativa ganancia en resistencia mecánica, dando como resultado una relación entre la inversión y desempeño mucho más favorable y equilibrada que las dosificaciones menores. De lo anterior, si se llega a optar por la incorporación de microsilíce en la mezcla de concreto, el reemplazo del 12 % es indudablemente la alternativa más eficiente entre las demás mezclas modificadas; no porque sea económica, sino que es la única mezcla que ofrece retorno real en el desempeño estructural, lo suficientemente alto como para justificar el sobre costo adicional.

Figura 25

Comparación entre los crecimientos del precio del concreto, aumento de la resistencia y aumento en el valor por unidad de resistencia.



Fuente: Elaboración propia.

Para aterrizar los resultados en términos prácticos, se realizó la cotización de una mezcla de concreto con propiedades mecánicas similares al diseño de mezcla con 12 % de reemplazo, dicha mezcla tiene un valor de \$672.000/m³. Mientras que el diseño de mezcla con 12 % de reemplazo arrojó un costo estimado de \$776.000/m³, lo que representa un incremento del 15,5 % frente a la mezcla comercial, esta diferencia, dependiendo de las características de la obra, puede llegar a ser asumible en casos que la situación lo amerite. No obstante, en proyectos de gran escala, ese 15,5 % se convierte rápidamente en una cifra que exige una justificación técnica muy sólida antes de aprobar cualquier presupuesto.

Figura 26

Cotización realizada para 8 metros cúbicos de concreto en Bogotá, DC.

Concretos: Productos	Cantidad (m3)	U Antes de IVA	Total A. IVA	Total IVA
(6000psi) Convencional 420kg/cm2 Grava 1" 28 días As 8" 20cm	8	\$ 564.798	\$ 4.518.384	\$ 5.376.877
Total Concreto Productos	8		\$ 4.518.384	\$ 5.376.877

Nota: La cotización señala 8 metros cúbicos, el precio por metro cúbico es de \$ 672.000

Fuente: Cemex Colombia.

Conclusiones

Se demostró que el reemplazo parcial de cemento por microsílize en la mezcla de concreto disminuye progresivamente la trabajabilidad del concreto en estado fresco, esto se debe al incremento en la superficie de los sólidos, la cual demanda una mayor cantidad de agua y se expresa como una disminución en el asentamiento.

Además de esto, a la edad de 28 días, se halló que el reemplazo parcial de 12% de microsílize en mezclas de concreto incrementa hasta un 27 % su resistencia a la compresión con respecto a la muestra patrón.

Desde la perspectiva económica, los reemplazos del 5 % y 9 % resultaron técnica y financieramente poco viables, al combinar sobrecostos elevados con ganancias de resistencia marginales. La mezcla con 12%, aunque implica un incremento de costo del 66% frente al concreto convencional, ofrece la mejora estructural más representativa entre las dosificaciones modificadas, consolidándose como la alternativa más eficiente del programa experimental.

Desde la perspectiva económica, los reemplazos de 5 % y 9 % resultaron financieramente y mecánicamente inviables, esto dado los sobrecostos relacionados con los deficientes incrementos de resistencia en comparación con la mezcla patrón. Por otro lado, aunque la mezcla con 12 % de

reemplazo presenta un incremento en el costo del 66 %, ofrece una mejora estructural más representativa de mezclas modificadas, lo que a su vez la ubica como la alternativa más eficiente entre las mezclas modificadas.

Por lo tanto, el uso de microsílíce en reemplazo parcial de cemento en mezclas de concreto es recomendado en proyectos que demanden concreto de alto desempeño mecánico, o en obras que no cuenten con acceso o suministro de concreto premezclado que requieran concreto con propiedades mecánicas superiores mediante la dosificación en situ. Para aplicaciones convencionales, el patrón de mezcla conserva su superioridad en términos de relación costo-resistencia. La viabilidad del uso de microsílíce estará determinada, en última instancia, por el equilibrio entre los requisitos estructurales, las condiciones constructivas y el presupuesto disponible.

Lista de Referencia o Bibliografía

López Yépez, L. G. (2011). Influencia del porcentaje de adición de la microsilice y del tipo de curado en la penetración del ion cloruro en el concreto de alto desempeño. *Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola*.

Universidad Nacional de Cajamarca & Yovan, E. (2014). *Propiedades mecánicas del concreto elaborado con aditivo microsilice*.

Microsilice. (2019). Microsilice como aditivo.

<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/microsilica>

Albitres Barrantes, V. R., & Loyola Sanchez, I. F. (2025). Efecto de la Microsilice y Nanosilice como sustituto parcial del cemento en las propiedades físicas-mecánicas del concreto de alta resistencia.

Escobedo Villaruel, J. E. et. al (2023). “Evaluación del uso de microsilice como Material Cementicio Suplementario (MCS) en el hormigón” en: Álvaro G. Sánchez Bellido, Juan Carlos Rojas Vidovic, Alan J. Aparicio Ortubé, Enio J. Pazini Figueiredo y Pedro Castro Borges (Eds.), *Memorias del XVII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y XVIX Congreso de Control de Calidad en la Construcción, CONPAT 2023*. Santa Cruz de

Najera Ponce, L. MANUAL LAB DE CONCRETO.

Cordero E., G. D. ., Cárdenas G., J. A., & Rojas Suarez, J. P. . (2022). Diseño de mezclas de concreto aplicando el método ACI.

