



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

TEMA: “Evaluación de resistencia a compresión, tracción indirecta y módulo de elasticidad del hormigón de alta resistencia con la utilización de microsílice o humo de sílice”.

Trabajo de Titulación, previo a la obtención del Título de Cuarto Nivel de Ingeniería Civil

Modalidad del Trabajo de Titulación: Trabajo experimental

Autor: Chancay Andino Erick Ignacio

Director: Ing. Viscaíno Cuzco Mayra Alexandra, Mg.

Ambato - Ecuador

2025

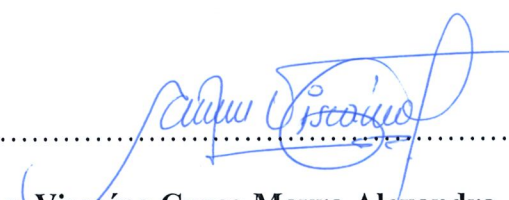
APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de tutor del trabajo experimental, previo a la obtención del Título de Ingeniero Civil, con el tema: **"EVALUACIÓN DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN, TRACCIÓN INDIRECTA Y MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA CON LA UTILIZACIÓN DE MICROSÍLICE O HUMO DE SÍLICE"**, elaborado por el estudiante Erick Ignacio Chancay Andino, portador de la cédula de ciudadanía número 0803747005, estudiante de la Carrera de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

Certifico:

- Que el presente trabajo experimental es original de su autor.
- Ha sido revisado cada uno de sus capítulos componentes.
- Está concluido en su totalidad.

Ambato, julio 2025



.....

Ing. Viscaíno Cuzco Mayra Alexandra, Mg.

TUTOR

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **Erick Ignacio Chancay Andino**, con C.I. 0803747005 declaro que todos los contenidos y actividades expuestos en el desarrollo del presente trabajo experimental con el tema: **"EVALUACIÓN DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN, TRACCIÓN INDIRECTA Y MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA CON LA UTILIZACIÓN DE MICROSÍLICE O HUMO DE SÍLICE"**, así como también los análisis estadísticos, gráficos, conclusiones y recomendaciones son de mi exclusiva responsabilidad como autor del trabajo experimental, a excepción de las referencias bibliográficas citadas en el mismo. En tal virtud, el contenido, efectos legales y académicos que se desprenden del mismo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Ambato, julio 2025



.....

Erick Ignacio Chancay Andino

C.C. 0803747005

AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este trabajo experimental o parte de él, un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos en línea patrimoniales de mi trabajo experimental, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este documento dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Ambato, julio 2025



.....
Erick Ignacio Chancay Andino

C.C. 0803747005

AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe del trabajo experimental, realizado por el estudiante **Erick Ignacio Chancay Andino**, de la Carrera de Ingeniería Civil bajo el tema: **"EVALUACIÓN DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN, TRACCIÓN INDIRECTA Y MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA CON LA UTILIZACIÓN DE MICROSÍLICE O HUMO DE SÍLICE"**.

Ambato, julio 2025

Para constancia firma:



Ing. Diego Chérrez.

C.C. 1803324894

MIEMBRO CALIFICADOR



Ing. Jorge Guevara

C.C.1803250503

MIEMBRO CALIFICADOR

DEDICATORIA

Con el corazón lleno de gratitud y orgullo, dedico esta tesis a mis amados padres, Neris Chancay y Silvia Andino, quienes fueron el pilar fundamental en la construcción de este sueño que durante tanto tiempo anhelé. Desde mis primeros pasos en la educación hasta este gran logro, su amor, sacrificio y apoyo incondicional han sido la base sobre la que he construido mi camino. Gracias por ser mi refugio en los momentos difíciles, por creer en mí incluso cuando yo mismo dudaba, y por darme la fuerza para continuar cada día. Sin ustedes, este logro no habría sido posible.

Pero también me dedico esta tesis a mí mismo, porque sé todo lo que costó llegar hasta aquí. No haré de menos cada esfuerzo, cada desvelo, cada sacrificio y cada lucha interna que enfrenté en este proceso universitario. Hubo días buenos en los que todo parecía ir bien, pero también hubo días difíciles, llenos de incertidumbre, cansancio y frustración. Sin embargo, en cada obstáculo encontré la motivación para seguir adelante, para centrarme en mis estudios y recordar las metas que me propuse desde el inicio. Hoy, al ver este trabajo finalizado, sé que cada desafío valió la pena y que este logro es el resultado de mi perseverancia y determinación.

A mis padres, a mi esfuerzo y a cada momento vivido en este camino, les dedico con orgullo este triunfo.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios, quien ha sido mi guía y fortaleza en cada etapa de este camino. Su luz me ha dado la sabiduría y la perseverancia necesarias para alcanzar esta meta. A mis padres, por su amor incondicional, apoyo constante y sacrificios, quienes con su esfuerzo han sido mi mayor inspiración. A mis hermanos y familiares, que siempre estuvieron pendientes de mi bienestar y progreso, brindándome palabras de aliento y compañía en los momentos más desafiantes.

También quiero expresar mi gratitud a los amigos que me acompañaron a lo largo de esta carrera. Gracias por su amistad, por compartir experiencias, aprendizajes y por hacer que la estancia en una ciudad y un entorno nuevo fuera mucho más llevadera. Sin ustedes, este camino habría sido mucho más difícil. A todos, mi más sincero agradecimiento.

Finalmente, mi gratitud a los ingenieros y docentes que impartieron su conocimiento, guiándonos con su experiencia y preparación, formando en nosotros las bases para, en un futuro, contribuir con grandes obras y proyectos que dejen huella en la sociedad.

INDICE GENERAL DE CONTENIDOS

PORTADA.....	i
--------------	---

A la unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

¡Error! Marcador no definido.

DERECHOS DE AUTOR.....	¡Error! Marcador no definido.
------------------------	--------------------------------------

DEDICATORIA.....	vi
------------------	----

AGRADECIMIENTO.....	vii
---------------------	-----

INDICE GENERAL DE CONTENIDOS	viii
------------------------------------	------

INDICE GENERAL DE FIGURAS.	xiv
---------------------------------	-----

RESUMEN EJECUTIVO	xvi
-------------------------	-----

ABSTRACT	xvii
----------------	------

CAPÍTULO I.- MARCO TEÓRICO.....	1
---------------------------------	---

I. JUSTIFICACIÓN.....	1
-----------------------	---

II. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS.....	3
--------------------------------------	---

III. OBJETIVOS.....	6
---------------------	---

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA	7
--------------------------------	---

I. EQUIPOS Y MATERIALES.....	7
------------------------------	---

II. MÉTODOS	11
-------------------	----

CAPÍTULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	31
--	----

I. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	31
--	----

II. VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS.	68
-------------------------------------	----

CAPITULO IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIÓN.	77
I. CONCLUSIONES.	77
II. RECOMENDACIONES.	79
BIBLIOGRAFÍA:.....	80
ANEXOS.....	84

INDICE GENERAL DE TABLAS

TABLA I. INVESTIGACIONES SOBRE EL USO DE MICRO SÍLICE EN HORMIGONES DE ALTA RESISTENCIA.	5
TABLA II. MATERIALES UTILIZADOS PARA LA INVESTIGACIÓN	7
TABLA III. EQUIPOS UTILIZADOS EN LA FASE I	9
TABLA IV. EQUIPOS USADOS EN FASE II.....	10
TABLA V. EQUIPOS UTILIZADOS EN LA FASE III.....	11
TABLA VI. ENSAYOS DE LOS AGREGADOS DEL HORMIGÓN.	14
TABLA VII. TAMAÑOS DE TAMICES PARA TAMAÑO NOMINAL, ADAPTADO DE [1] AUTOR.....	POR 14
TABLA VIII. ASENTAMIENTO RECOMENDADO PARA HORMIGONES CON Y SIN HRWR (PLASTIFICANTE) [2].....	18
TABLA IX. AGREGADO GRUESO DE TAMAÑO SUGERIDO. ADAPTACIÓN DE [2] POR AUTOR.....	19
TABLA X. VOLUMEN RECOMENDADO DE AGREGADO GRUESO POR UNIDAD DE VOLUMEN DE CONCRETO. ADAPTACIÓN DE [2] POR AUTOR	19
TABLA XI. PRIMERA ESTIMACIÓN DEL REQUERIMIENTO DE AGUA DE MEZCLADO Y CONTENIDO DE AIRE DEL CONCRETO RECIÉN MEZCLADO BASADO EN EL USO DE AGREGADO FINO CON 35% DE VACÍOS. ADAPTACIÓN DE [2] POR AUTOR	20
TABLA XII. RECOMENDACIÓN MÁXIMA DE (A/CM) PARA HORMIGONES ELABORADOS CON Y SIN HRWR. ADAPTACIÓN DE [2] POR AUTOR	21
TABLA XIII. CODIGO DE PROBETAS DE ENSAYOS.....	24

TABLA XIV. CODIGO DE PROBETAS DE ENSAYOS DE HORMIGÓN BASE	27
TABLA XV. RESULTADOS ANALISIS GRANULOMÉTRIA DE AGREGADO FINO .	32
TABLA XVI. RESULTADOS ANALISIS GRANULOMÉTRIA DE AGREGADO GRUESO	34
TABLA XVII. RESULTADOS DENSIDAD REAL, RELATIVA Y CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO	35
TABLA XVIII. RESULTADOS DENSIDAD REAL, RELATIVA Y CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO	36
TABLA XIX. RESULTADOS DENSIDAD REAL, RELATIVA Y CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO	37
TABLA XX. RESULTADOS DENSIDAD DEL CEMENTO.....	38
TABLA XXI. RESULTADOS ENSAYO DE ABRASIÓN.....	39
TABLA XXII. RESULTADOS ENSAYO DE DENSIDAD APARENTE, SUELTA Y COMPACTADA DEL AGREGADO GRUESO	40
TABLA XXIII. RESULTADOS ENSAYO DE DENSIDAD APARENTE, SUELTA Y COMPACTADA DEL AGREGADO FINO.....	41
TABLA XXIV. RESULTADOS ENSAYO DE CONTENIDO DE HUMEDAD DEL AGREGADO FINO	42
TABLA XXV. RESULTADOS ENSAYO DE CONTENIDO DE HUMEDAD DEL AGREGADO GRUESO	43
TABLA XXVI. ESFUERZO DE DISEÑO PARA DOSIFICACIÓN.....	44
TABLA XXVII. DATOS DE AGREGADO FINO.....	45
TABLA XXVIII. DATOS DE AGREGADO FINO	45
TABLA XXIX. DATOS DE MATERIAL CEMENTANTE	45

TABLA XXX. VALORES PARA INTERPOLAR.....	48
TABLA XXXI. VALOR DE INTERPOLACIÓN	48
TABLA XXXII. VOLUMEN DE MATERIALES PARA UNA Yd ³	49
TABLA XXXIII. CANTIDAD DE MATERIALES EN LB Y KG	49
TABLA XXXIV. DOSIFICACION DE MATERIALES	49
TABLA XXXV. DOSIFICACIÓN PARA 60 KG	50
TABLA XXXVI. DOSIFICACION DE HORMIGÓN BASE PARA 60 Kg	52
TABLA XXXVII. DOSIFICACION DE HORMIGÓN CON TRES PORCENTAJES DE MICROSILICE. PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO DEL HORMIGÓN	52
TABLA XXXVIII. PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO DEL HORMIGÓN PATRÓN.....	53
TABLA XXXIX. PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO DEL HORMIGÓN 3%	53
TABLA XL. PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO DEL HORMIGÓN 8%.....	53
TABLA XLI. PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO DEL HORMIGÓN 12%.....	53
TABLA XLII. DOSIFICACION DE HORMIGÓN PATRÓN Y CON TRES PORCENTAJES DE MICROSILICE	54
TABLA XLIII. RESISTENCIA DEL HORMIGÓN PATRÓN	55
TABLA XLIV. RESISTENCIA DEL HORMIGÓN CON MICROSILICE AL 3%	56
TABLA XLV. RESISTENCIA DEL HORMIGÓN CON MICROSILICE AL 8%.....	57
TABLA XLVI. RESISTENCIA DEL HORMIGÓN CON MICROSILICE AL 12%	58
TABLA XLVII. RESISTENCIA DEL HORMIGÓN PATRÓN.....	60

TABLA XLVIII. RESISTENCIA DEL HORMIGÓN CON MICROSILICE AL 3%.....	61
TABLA XLIX. RESISTENCIA DEL HORMIGÓN CON MICROSILICE AL 8%	62
TABLA L. RESISTENCIA DEL HORMIGÓN CON MICROSILICE AL 12%	63
TABLA LI. CÁLCULO TEÓRICO DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD.	65
TABLA LII. RESULTADOS DEL VALOR ASOCIADO AL ESTADÍSTICO F	70
TABLA LIII. RESULTADOS DE LA PRUEBA TUKEY PARA LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN ENTRE HORMIGÓN PATRÓN Y LOS ESPECÍMENES CON EL 3%, 8% Y 12% DE MICROSÍLICE	72
TABLA LIV RESULTADOS DEL VALOR ASOCIADO AL ESTADÍSTICO F...	74
TABLA LV RESULTADOS DE LA PRUEBA TUKEY PARA LA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN INDIRECTA ENTRE HORMIGÓN PATRÓN Y LOS ESPECÍMENES CON EL 3%, 8% Y 12% DE MICROSÍLICE.	76

INDICE GENERAL DE FIGURAS.

Fig. 1. Recolección de arena Negra Baños-Tungurahua.	12
Fig. 2. Recolección del agregado grueso en la Cantera de la Constructora Alvarado.	13
Fig. 3. Elaboración de probetas de hormigón.	24
Fig. 4. Desmolde y clasificado de las probetas base.	24
Fig. 5. Proceso de compactación.	25
Fig. 6. Asentamiento del hormigón.	25
Fig. 7. Temperatura del hormigón en estado fresco.	26
Fig. 8. Curado de probetas de hormigón.	27
Fig. 9. Ensayo a compresión.	28
Fig. 10. Ensayo de tracción indirecta.	29
Fig. 11 Granulometría de agregado fino.	33
Fig. 12 Granulometría de agregado grueso.	34
Fig. 13 Valores de compresión	55
Fig. 14. Valores de resistencia máxima a la compresión con 3%.	56
Fig. 15. Valores de resistencia máxima a la compresión con 8%.	57
Fig. 16. Valores de resistencia máxima a la compresión con 12%.	58
Fig. 17. Valores comparativos de las diferentes dosificaciones.	59
Fig. 18. Valores de tracción indirecta del hormigón base.	60
Fig. 19. Valores de tracción indirecta del hormigón con el 3% de microsilíce.	61

Fig. 20. Valores de tracción indirecta del hormigón con el 8% de microsílíce.....	62
Fig. 21. Valores de tracción indirecta del hormigón con el 12% de microsílíce.....	63
Fig. 22. Valores comparativos de las diferentes dosificaciones..	64
Fig. 23. Valores comparativos de las diferentes dosificaciones.	66
Fig. 24 Caja Bigote para la hipótesis de la resistencia a la compresión.	69
Fig. 25 Caja Bigote para la hipótesis de la resistencia a la tracción indirecta.....	74

RESUMEN EJECUTIVO

La microsílice surge como una alternativa viable para mejorar las propiedades mecánicas del hormigón. En este contexto, la presente investigación evalúa el efecto del humo de sílice en la resistencia a compresión, tracción indirecta y en el cálculo teórico del módulo de elasticidad del hormigón de 450 kg/cm². La metodología aplicada se dividió en tres fases: la primera consistió en la caracterización de los agregados finos y gruesos conforme a normas técnicas estandarizadas; la segunda incluyó la dosificación de mezclas de hormigón siguiendo el procedimiento de la norma ACI 211.4R, empleando tres porcentajes de microsílice como reemplazo parcial del cemento: 3 %, 8 % y 12 %; finalmente, la tercera fase comprendió la evaluación de las propiedades mecánicas del hormigón mediante ensayos de compresión y tracción indirecta, así como el cálculo teórico del módulo de elasticidad conforme a las fórmulas propuestas por el ACI.

Mediante un análisis de varianza (ANOVA), se determinó con un 95 % de confianza que existe una diferencia estadísticamente significativa entre el hormigón patrón y el modificado con 3 % de microsílice. Este porcentaje generó un incremento del 26,1 % en la resistencia a compresión, del 28,15 % en la tracción indirecta. Así mismo el cálculo teórico del módulo de elasticidad del hormigón mostró que la adición de un 3 % de microsílice como reemplazo parcial del cemento mejora la rigidez del material. Según las fórmulas aplicadas, los incrementos fueron del 3.41 % (según Autores como Mostofinejad y Nozhati), 12.28 % (ACI 318) y 9.33 % (ACI 363), todos en comparación con el hormigón patrón. Estos valores confirman que la microsílice, en proporciones moderadas, contribuye a un mejor comportamiento elástico del hormigón, siendo especialmente relevante en estructuras que requieren alta capacidad de deformación bajo carga controlada

En conclusión, los resultados sugieren que el uso controlado de microsílice puede representar una mejora significativa en la calidad del hormigón empleado en edificaciones e infraestructuras, promoviendo mayor durabilidad y resistencia dentro del contexto de la construcción ecuatoriana.

DESCRIPTORES: HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA, MICROSÍLICE, MÓDULO DE ELASTICIDAD, RESISTENCIA A COMPRESIÓN, TRACCIÓN INDIRECTA.

ABSTRACT

Silica fume emerges as a viable alternative to enhance the mechanical properties of concrete. In this context, the present study evaluates the effect of silica fume on the compressive strength, indirect tensile strength, and the theoretical calculation of the modulus of elasticity of 450 kg/cm² concrete. The methodology was divided into three phases: the first involved the characterization of fine and coarse aggregates according to standardized technical norms; the second included the concrete mix design following the ACI 211.4R method, using three silica fume replacement ratios of cement: 3%, 8%, and 12%; finally, the third phase comprised the evaluation of mechanical properties through compressive and indirect tensile strength tests, as well as the theoretical calculation of the modulus of elasticity according to ACI-based formulas.

Through an analysis of variance (ANOVA), it was determined with 95% confidence that there is a statistically significant difference between the control concrete and the one modified with 3% silica fume. This percentage led to an increase of 26.1% in compressive strength and 28.15% in indirect tensile strength. Likewise, the theoretical calculation of the modulus of elasticity showed that adding 3% silica fume as a partial cement replacement improves the material's stiffness. According to the applied formulas, the increases were 3.41% (based on authors such as Mostofinejad and Nozhati), 12.28% (ACI 318), and 9.33% (ACI 363), all in comparison to the control concrete. These results confirm that silica fume, when used in moderate proportions, contributes to improved elastic behavior of concrete, which is particularly relevant in structures requiring high deformation capacity under controlled loading conditions.

In conclusion, the results suggest that the controlled use of silica fume can represent a significant improvement in the quality of concrete used in buildings and infrastructure, promoting greater durability and strength within the context of Ecuadorian construction.

KEYWORDS: COMPRESSIVE STRENGTH, HIGH-STRENGTH CONCRETE, INDIRECT TENSILE STRENGTH, MODULUS OF ELASTICITY, SILICA FUME.

CAPÍTULO I.- MARCO TEÓRICO

I. JUSTIFICACIÓN.

Ecuador, está ubicado en una zona altamente sísmica y con una variedad de condiciones climáticas. Las construcciones aquí han experimentado numerosos terremotos a lo largo de su historia, como el terremoto de Ambato en 1918 y el terremoto de Pedernales en 2016; con pérdidas humanas y materiales [3]. Por las normas de construcción se han ido actualizando con el pasar de los años para garantizar obras civiles resistentes y duraderas ante este tipo de catástrofes naturales.

El hormigón a principios del siglo XX resistía inicialmente 14 MPa, con el pasar de los años, dados los requerimientos duplicó sus propiedades. Ahora existen obras que demandan hormigones de alto desempeño, lo que limitan su construcción, generando ciertas desventajas en algunas aplicaciones.

Localmente, existen obras que requirieron hormigones de alto desempeño como [4]:

- Sector Gas/Petróleo; Refinería de Esmeraldas (490 kg/cm²), Monte Chorrillo (490 kg/cm²).
- Sector Eléctrico; Coca codo Sinclair (590 kg/cm²), Manduriacu (500 kg/cm²), Toachi Pilatón (490 kg/cm²), Soplador (490 kg/cm²).

El comité del “Instituto Americano del Concreto” (ACI), se creó dada la demanda y requerimiento del hormigón de alto desempeño dedicando inicialmente sus estudios a este, produciendo normativas e instructivos que facilitarán su utilización [5].

La resistencia, durabilidad y versatilidad del hormigón lo hacen ideal para una amplia variedad de proyectos, desde viviendas hasta grandes infraestructuras. En Ecuador, particularmente en Quito, predomina la construcción informal. Cerca del 70% de las edificaciones en la capital son informales, y la mayoría de estas (91.8%) están hechas de hormigón armado, demostrando que, pese a la carencia del conocimiento de la normativa y falta de inspecciones profesionales, el hormigón es el material de construcción más utilizado en la actualidad [6].

Ahora bien, según [7], la durabilidad del hormigón es una variable compleja

influenciada por diversos factores, que pueden agruparse en dos categorías: los relacionados con las condiciones de exposición y los propios del hormigón. El ambiente de exposición influye en la estructura debido a cargas, agresividad del entorno, clima y eventos como incendios o sismos. Además, los factores internos del hormigón dependen de la ejecución, como herramientas, materiales, dosificación, técnicas y mantenimiento. La microsílice, en combinación con aditivos reductores de agua, mejora significativamente el desempeño del hormigón al reducir su porosidad, lo que permite alcanzar altas resistencias a la compresión, llegando a valores de hasta 1423 kg/cm² a los 90 días. Esto demuestra que una correcta dosificación, junto con el uso adecuado de aditivos, es clave para obtener hormigones de alta resistencia [8].

Al utilizar microsílice en la producción de hormigones de alta resistencia, es fundamental adoptar medidas de seguridad al momento de utilizarla, ya que su finura facilita la inhalación, lo que puede provocar problemas de salud como la silicosis [9].

Diversos estudios en Ecuador e internacionalmente indican que para elaborar hormigones de alta resistencia es crucial seguir medidas de seguridad industrial y considerar que la microsílice reduce la trabajabilidad de la mezcla dada por su finura lo que reduce la porosidad del concreto y aumenta su absorción de agua, por lo que se recomienda usar aditivos plastificantes. El hormigón de alto desempeño exige más que el tradicional, pero permite reducir el tamaño de secciones estructurales. Sin embargo, en Ecuador su uso es limitado, en gran parte debido a la falta de enseñanza en instituciones de educación superior.

El desarrollo y aplicación del hormigón de alta resistencia (HAR) en este país presenta grandes oportunidades para mejorar la calidad y durabilidad de las estructuras, especialmente en una región con alta actividad sísmica y condiciones climáticas diversas. Sin embargo, su implementación enfrenta desafíos, principalmente debido a la falta de difusión y enseñanza en las instituciones de educación superior, así como la necesidad de adoptar prácticas más rigurosas en el diseño y dosificación de mezclas. El uso de microsílice, combinado con aditivos plastificantes, ofrece ventajas claras en términos de resistencia y desempeño estructural, permitiendo el desarrollo de obras más eficientes y duraderas. Es esencial que los profesionales del sector de la construcción adopten estas tecnologías y normativas internacionales, como las guías del ACI, para impulsar la construcción de estructuras más seguras y sostenibles en el país.

II. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS.

Para generar hormigones de alto desempeño existen ciertas limitaciones y requerimientos en los cuales no es correcto realizar métodos de mezclado o diseño de mezclas tradicionales, esto conduce a la utilización de la guía ACI-211.4R para la producción de hormigón de alto rendimiento (HAR). Este tipo de hormigón, con una resistencia a compresión superiores a 42 MPa, son fundamentales en proyectos de gran envergadura como represas, puentes y edificios altos, asimismo se requiere un material de construcción confiable y duradero [10].

El hormigón de alta resistencia se define como aquel que cuenta con una resistencia a la compresión igual o mayor a 40 MPa (6000 Psi) el cual no incluye ningún otro material o técnica exótica, actualmente 40 MPa es la línea divisoria entre el hormigón de resistencia normal y de alta resistencia, según la guía ACI 363.2R [11].

La familia de los materiales cementantes abarca una amplia gama de sustancias, desde la escoria de alto horno hasta aditivos como las cenizas volantes y la microsílíce. Estos materiales, al entrar en contacto con el agua, inician un proceso de hidratación que culmina en la formación de compuestos de silicatos mono-cálcicos, confiriendo al material resultante resistencia y durabilidad. Su capacidad para unir partículas los convierte en un componente esencial en la producción de materiales de construcción como el concreto y el mortero [12].

La microsílíce, subproducto de la producción de silicio en hornos de arco eléctrico a más de 2000 °C, es utilizada en la industria de la construcción para mejorar las propiedades mecánicas del hormigón. Al actuar como filler, reduce la porosidad del concreto, lo que incrementa su resistencia en condiciones de exposición severa y mejora su impermeabilidad [13].

El humo de sílice es un material clave en la producción de concreto de alta resistencia debido a su alta actividad puzolánica; sin embargo, su adición directa a la mezcla disminuye la trabajabilidad y el peso unitario del concreto fresco. Por ello, es recomendable considerar el uso de plastificantes para mejorar la trabajabilidad de la mezcla [14].

El uso de la microsílíce en el hormigón ha tenido un impacto significativo a nivel

mundial, siendo esencial para lograr altas resistencias desde su implementación en la década de los 80. Sin embargo, en Ecuador son pocos los profesionales que consideran su utilización, a pesar de la creciente necesidad de este componente en la producción de concreto de alta resistencia [15].

En los últimos años, diversos estudios han explorado el uso de micro sílice como aditivo en hormigones de alta resistencia, destacando su impacto positivo en las propiedades mecánicas y durabilidad del material. Para [16], La utilización de microsilíce al 3%, en sustitución del cemento, es el porcentaje óptimo. Los ensayos mostraron un incremento en la resistencia a compresión de 12-15% frente a la muestra sin microsilíce, un aumento en tracción indirecta de 39-43%, en flexión de vigas de 11-27%, y en Pull-Out del 2.5%. El módulo de elasticidad aumentó entre 10-14%. Por otro lado, según, la alta resistencia a la compresión del concreto en estado endurecido se debe a una buena dosificación y al empleo de un aditivo superplastificante más la microsilíce. La adecuada combinación de materiales de buena calidad, con aditivos (superplastificantes) y adiciones (microsilíce) han permitido obtener un buen desempeño para los concretos de alta resistencia. En una investigación de [17], se utilizó cemento tipo IP y microsilíce Rheomac SF 100 en un 8 %, las probetas ensayadas dieron como resultado una resistencia de 73.62 MPa, correspondiente al 105.32 % respecto a la resistencia requerida esperada. Para la dosificación de hormigones de alta resistencia se recomienda el uso de plastificantes, por otro lado, productores de microsilíce recomiendan el uso de este producto como reemplazo del cemento en pequeños porcentajes, La TABLA I resume las investigaciones más relevantes sobre este tema, con énfasis en las variables clave y los resultados obtenidos.

TABLA I.
INVESTIGACIONES SOBRE EL USO DE MICRO SÍLICE EN HORMIGONES DE ALTA RESISTENCIA

Autor(es)	Referencia	Año	Objetivo del estudio	% Óptimo de microsilíce	% Óptimo de aditivo plastificante
CajilemaCh. Jairo y Morales R. Jerson	[18]	2020	Analizar la incidencia del microsilíce en el diseño de hormigones de alta resistencia, en remplazo parcial del peso total de cemento.	3%	-
Robert Paul Buenaño Sanchez	[17]	2014	Por medio de investigaciones experimentales, determinar la dosificación apropiada para elaborar un 53 MPa ($f'_c = 53$ MPa), utilizando el cemento Armaduro especial de la línea hormigón con una resistencia especificada igual a Lafarge y agregados de la cantera del sector de Guayllabamba; para de esta forma demostrar que, con un estudio apropiado, se puede elaborar un hormigón con una alta resistencia requerida real ($f'_{cr} = 63,30$ MPa), utilizando los componentes mencionados.	8%	1,5
Ing.Mg. Jorge Emiliano Bedón López	[16]	2017	Diseñar un tipo de Concreto de Alta Resistencia que se ajuste a los requerimientos de las Obras Civiles en las Zonas Altoandinas del Perú.	12%	1,5

III. OBJETIVOS

A. Objetivo general:

Evaluar la resistencia a compresión, tracción indirecta y módulo de elástico teórico del hormigón de alta resistencia con la utilización de microsílice o humo de sílice.

B. Objetivos específicos:

- Evaluar las propiedades físicas y mecánicas de los agregados finos y gruesos.
- Determinar la dosificación del hormigón simple de $f'_c = 450 \text{ kg/cm}^2$ a los 28 días de edad y dosificar mezclas de hormigón simple reemplazando parcialmente el peso del cemento con varios porcentajes de microsílice.
- Evaluar el desempeño de la resistencia a compresión y tracción indirecta de las distintas muestras de hormigón con diferente porcentaje de microsílice con el hormigón patrón de 450 kg/cm^2 y módulo de elasticidad teórico.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

En el presente trabajo de investigación con una metodología experimental se desarrolló este trabajo mediante tres fases. La primera fase, consta de estudios y ensayos que brindaron las propiedades físicas y mecánicas de los agregados, cumpliendo el requerimiento para hormigones. La segunda fase, se enfocó en realizar una dosificación base de 450 Kg/cm² a los 28 días de curado y la evaluación de las propiedades físicas y mecánicas para generar una mezcla de hormigón modificado parcialmente con micro sílice, En la tercera fase, se comparó el comportamiento en resistencia a la compresión, tracción indirecta, a los 28 días de curado y cálculo del módulo de elasticidad, de muestras de hormigón con micro sílice en tres porcentajes distintos frente a hormigones convencionales.

I. EQUIPOS Y MATERIALES

En este trabajo experimental, se emplearon materiales básicos comunes en la producción de concreto, junto con herramientas menores necesarias para su correcta ejecución. Los materiales y equipos utilizados en cada etapa se describirán detalladamente en función de las fases planteadas. Cabe destacar que todos los recursos empleados forman parte de los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

1) Materiales.

Los materiales utilizados se detallan en la TABLA II:

TABLA II.
MATERIALES UTILIZADOS PARA LA INVESTIGACIÓN.

Material	Detalle
Arena	lavada de la Mina de baños
Grava	3/4" Proveniente de las Viñas
Cemento	Tipo IP de la marca "Armادuro"
Agua	Totalmente Potable
Aditivo	Plastificante
Microsílice	M life SF 100

2) Equipos.

Fase I: Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de los agregados finos y gruesos.

Los equipos utilizados en esta primera fase se detallan a continuación y en la TABLA III se describen en qué ensayos fueron empleados.

- **Horno eléctrico:** Marca Humboldt, con un voltaje de 110 V y una temperatura regulable de hasta 232°C.
- **Tamices Cuadrados Metálicos:** Tamaños de 1", ¾", ½", 3/8", #4 y bandeja, las cuales tienen una dimensión de 50 x 50 cm.
- **Balanza eléctrica:** Marca Boeco con unidades de Kg y Gr.
- **Tamices Circulares Metálicos:** Tamaños de 3/8", #4, #8, #16, #30, #50, #100, #200, bandeja, con una dimensión de 25 x 25 cm.
- **Tamizadora electrónica:** Marca Controls, con una capacidad de hasta 15 tamices.
- **Máquina de los Ángeles:** Marca 48-D0500/G, con un tambor de acero.
- **Esferas para abrasión:** 11 esferas de material de acero.
- **Canastilla metálica:** Contiene una malla #8, con dimensiones de 20.3 x 20.3 cm.
- **Picnómetro y pipeta:** Capacidad de 500 ml de vidrio.
- **Cono:** Diámetro de 40 x 90 x 70 mm de bronce.
- **Pisón:** Diámetro de 25.5 x 170 mm de acero

TABLA III
EQUIPOS UTILIZADOS EN LA FASE I.

Ensayos	Equipos											
	Horno Eléctrico	Tamices Metálicos	Balanza electrónica	Máquina de los Ángeles	Esferas para abrasión	Picnómetro y Pipeta	Molde metálico para densidad aparente	Varilla Compactadora	Cono y pisón	Canastilla Metálica	Gasolina	Tamizadora eléctrica
Análisis granulométrico del agregado grueso	X	X	X									
Análisis granulométrico del agregado fino	X	X	X									X
Abrasión de los agregados gruesos	X	X	X	X	X							
Densidad real y capacidad de absorción de agregado grueso	X		X							X		
Densidad real y capacidad de absorción de agregado fino	X		X			X			X			
Densidad aparente suelta y compactada de los agregados			X				X	X				
Densidad del cemento						X					X	
Contenido de Humedad de los agregados	X											

Fase II: Determinación de la dosificación del hormigón simple de $f'c = 450 \text{ kg/cm}^2$ a los 28 días de edad y dosificar mezclas de hormigón simple con remplazo parcial del peso del cemento con varios porcentajes de microsilíce.

Los equipos que se emplearon en la elaboración de los cilindros patrón y con porcentajes de microsilíce, en esta fase fueron los que se muestran en la TABLA IV.

TABLA IV
EQUIPOS USADOS EN FASE II.

Equipos	Detalle
Cono de Abrams	Dimensiones:
	Base superior: 100mm
	Base inferior: 200 mm
	Altura: 300mm
Varilla compactadora de acero	Dimensiones: 16mm x 600mm
Concretera eléctrica	Voltaje: 110 a 220V
Martillo de goma	Material: caucho
Cámara de curado	Temperatura: $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$
	Dimensiones:
	Base superior: 100mm
	Base inferior: 200 mm
	Altura: 300mm
Molde de probetas normalizadas	Material: Acero
	Dimensiones:
	Altura: 200mm
	Diámetro: 100mm
Balanza electrónica	Marca: Boeco
	Unidad: Kg

Fase III: Evaluar el desempeño de la resistencia a compresión y tracción indirecta de las distintas muestras de hormigón con diferente porcentaje de microsilíce con el hormigón patrón de 450 kg/cm^2 y módulo de elasticidad teórico.

Por último, para la tercera fase, únicamente se utilizaron los siguientes equipos detallados en la TABLA V.

TABLA V
EQUIPOS UTILIZADOS EN LA FASE III.

Equipos	Detalle
Máquina de compresión y flexión.	Maquina hidráulica a prueba de explosiones.
	Marca Shimadzu, software: Trapecio X
	Capacidad:40 a 200 KN
Accesorios para tracción indirecta	Material: Acero

II. MÉTODOS

Los equipos y materiales utilizados en cada fase anteriormente mencionadas se explicarán a continuación.

Fase I: Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de los agregados finos y gruesos.

En la Fase I, se adquirieron los agregados pétreos finos y gruesos y se evaluaron sus propiedades físicas y mecánicas, fundamentales para la elaboración de hormigón, ya que estas influyen en su dosificación y preparación, lo que llevó a la aplicación de un método cuantitativo, dado por la recolección de datos y estudios previos junto con la revisión de resultados de ensayos normalizados los cuales se mencionarán posteriormente, permitiendo así cumplir con el objetivo planteado en esta fase. Las actividades realizadas en esta fase fueron las siguientes:

a) Recopilación de material bibliográfico respecto a la utilización de microsilíce en hormigones de alta resistencia.

Se recopiló toda la información necesaria sobre el uso de microsilíce en la fabricación de hormigones de alta resistencia, la presente investigación incluyó la revisión de normas técnicas y las directrices del ACI, NEC y ASTM, con un enfoque especial en los ensayos y procedimientos que permiten determinar las propiedades físicas y mecánicas de los materiales involucrados. Así como, investigaciones de diferentes autores que determinaron distintos porcentajes óptimos de humo de sílice de la misma forma de estudios recientes y literatura científica sobre el uso de microsilíce y

su impacto en la resistencia del hormigón. Por tal motivo, se realizó un análisis detallado de las pruebas a considerar, como los ensayos de compresión, tracción indirecta y el cálculo del módulo de elasticidad del mismo, junto con mediciones de densidad, porcentaje de absorción, entre otros valores necesarios para la dosificación. Se optó por la utilización del método de la ACI para hormigones de alta resistencia.

Para la selección del agregado fino, se realizó un ensayo de granulometría comparando arenas provenientes de distintas ciudades como La Concordia, Salcedo y Baños. Los resultados demostraron que la arena con la granulometría más adecuada se encontraba en Baños de Agua Santa. En consecuencia, se optó por utilizar arena negra de dicha localidad, la cual cumplió satisfactoriamente con todos los ensayos requeridos, incluyendo los establecidos por la norma INEN 696. Lo que respecta al agregado grueso se procedió a su adquisición en una cantera certificada ubicada en la ciudad de Ambato, ubicada en el sector de Las Viñas, perteneciente a Constructora Alvarado, donde se procedió a seleccionar el agregado de $\frac{3}{4}$ in, debido al seguimiento del instructivo de la ACI el cual recomienda que para hormigones <9000 Psi es recomendado esta gradación [2], corroborando así que cumpliera este tamaño nominal y los estándares de calidad en ensayos de laboratorio.



Fig. 1. Recolección de arena Negra Baños-Tungurahua.



Fig. 2. Recolección del agregado grueso en la Cantera de la Constructora Alvarado.

b) Ensayos de laboratorio de los agregados.

La etapa inicial de los ensayos y evaluaciones de los agregados destinados a la elaboración del hormigón es, sin duda, la fase más crucial en el desarrollo de este tipo de investigaciones. Este proceso preliminar constituye la base fundamental sobre la cual se sostiene todo el trabajo investigativo posterior. Durante esta primera fase, los resultados obtenidos de los ensayos no solo confirmaron la calidad de los agregados, sino que también demostraron que estos materiales poseen buenas propiedades mecánicas. Esto es clave, ya que dichas características permiten proceder con confianza en el diseño de hormigones, garantizando su desempeño y durabilidad en aplicaciones exigentes. Así, se asegura que los agregados utilizados cumplen con los estándares necesarios para soportar las demandas técnicas y estructurales requeridas, estableciendo un punto de partida sólido para la optimización del hormigón en términos de rendimiento y eficiencia, de esta forma en la TABLA VI, se observa los ensayos realizados y su normativa.

TABLA VI
ENSAYOS DE LOS AGREGADOS DEL HORMIGÓN.

ENSAYO	NORMATIVA
Análisis granulométrico de los agregados	INEN 696
Densidad relativa y absorción del árido fino	INEN 856
Densidad relativa y absorción del árido grueso	INEN 857
Masa unitaria y porcentaje de vacíos	INEN 858
Abrasión	INEN 860
%Humedad	INEN 862
Densidad del cemento	INEN 156

- **Análisis granulométrico de los agregados.**

Es fundamental en la evaluación de los agregados, ya que permite determinar la distribución de tamaños de las partículas que componen el material. Esta información es clave para asegurar una adecuada combinación de finos y gruesos, lo que influye directamente en la trabajabilidad, resistencia y durabilidad del hormigón.

Su ejecución, según normativas como la ASTM C136 o la INEN 696, implica el tamizado de una muestra de agregados a través de una serie de mallas con diferentes aperturas en la TABLA VII se detallan los tamaños de los tamices utilizados. Luego, se pesa el material retenido en cada tamiz y se calcula el porcentaje acumulado de cada fracción, lo que permite trazar una curva granulométrica obteniendo una curva que se compara con los límites establecidos para garantizar que el agregado cumple con las especificaciones requeridas para su uso en la construcción [1], [19].

TABLA VII
TAMAÑOS DE TAMICES PARA TAMAÑO NOMINAL, ADAPTADO DE [1] POR AUTOR.

Tamaño de Tamices			
Árido Fino		Árido Grueso	
(mm)	(in)	(mm)	(in)
9,5	3/8	50,8	2
4,75	N4	38,1	1 1/2
2,36	N8	26,67	1
1,18	N16	18,85	3/4
600	N30	13,32	1/2
300	N50	9,5	3/8
150	N100	0,15	4

- **Densidad relativa y absorción del árido fino.**

El ensayo de densidad real y capacidad de absorción del agregado fino mide la

densidad del material y la cantidad de agua que puede retener tras una inmersión de 24 horas. La densidad se determina comparando su peso en aire y agua, mientras que la absorción indica la porosidad del material. Estos parámetros son esenciales en la generación de hormigones, ya que influyen en la dosificación de agua, la trabajabilidad, y la resistencia final del hormigón, garantizando su durabilidad y calidad, según la norma INEN 856 [20].

La capacidad de absorción es la cantidad de agua que el agregado puede retener tras 24 horas de inmersión. En la arena el valor oscila entre 0,2% y 2% [20].

Densidad relativa del árido fino.

$$DR_{SSS} = \frac{S * \text{densidad de temperatura H}_2\text{O}}{(B+S-C)} \quad (1)$$

Donde:

DR_{SH} = Densidad relativa saturada superficialmente seca (gravedad específica)

B = Masa del picnómetro + agua a una temperatura determinada hasta marcar 500 ml.

S = Masa de la muestra saturada superficialmente seca (sss)

C = Masa del picnómetro + muestra + agua hasta marcar 500 ml.

Porcentaje de absorción del árido fino.

$$\%Abs = \frac{(S-A)}{A} * 100 \quad (2)$$

Donde:

%Abs = Porcentaje de absorción.

S = Masa de la muestra saturada superficialmente seca (sss).

A = Masa de la muestra secada al horno (SH).

- **Densidad relativa y absorción del árido grueso.**

El ensayo de densidad real y capacidad de absorción del agregado grueso mide la relación entre el peso del agregado en aire y en agua, y la cantidad de agua que puede absorber tras ser sumergido por un tiempo específico es importante en la generación de

hormigones porque influye en la resistencia, trabajabilidad y durabilidad del concreto, al determinar la proporción adecuada de materiales y el comportamiento del hormigón frente a la humedad, según la norma INEN 857 [21].

- **Densidad relativa del árido grueso.**

$$DR_{SS} = \frac{B * \text{factor de densidad de temperatura } H_2}{(B-C)} \quad (3)$$

Donde:

DR_{SS} = Densidad relativa saturada superficialmente seca (gravedad específica).

B = Masa en aire de la muestra superficialmente seca (sss).

C = Masa aparente en agua de la muestra saturada.

La capacidad de absorción corresponde a la cantidad de agua que el agregado puede retener tras ser sumergido durante 24 horas, y su valor oscila entre el 0,2% y el 4% para agregados gruesos [21].

- **Porcentaje de absorción del árido grueso.**

$$\%Abs = \frac{(B-A)}{A} * 100 \quad (4)$$

Donde:

%Abs = Porcentaje de absorción.

B = Masa en aire de la muestra superficialmente seca (sss).

A = Masa en aire de la muestra seca al horno.

- **Porcentaje de humedad de los agregados.**

El porcentaje de humedad es un ensayo importante para la elaboración de hormigones ya que permite saber el estado de saturación en el que se encuentran los agregados.

$$P = \frac{W-D}{D} * 100 \quad (5)$$

Donde:

P = Contenido total de humedad evaporable de la muestra en porcentaje.

W= Masa de la muestra original.

D= Masa de la muestra seca al horno

- **Ensayo de Abrasión de los áridos gruesos.**

El ensayo de abrasión de los agregados evalúa su resistencia al desgaste y la degradación mediante fricción y golpes. Se realiza usando una máquina de Los Ángeles, en la cual se colocan los agregados junto con bolas de acero, y luego se someten a rotación durante un número determinado de ciclos. Al final del ensayo, se mide la cantidad de material fino generado debido al desgaste. Este ensayo es importante porque determina la durabilidad del agregado en aplicaciones como pavimentos y estructuras de concreto expuestas a desgaste.

Ahora para realizar este cálculo dependerá del tamaño nominal de los agregados, posterior a la utilización de la máquina de los ángeles se utilizó la ecuación 6.

$$\% \text{ Desgaste} = \frac{W_i - W_f}{W_i} * 100 \quad (6)$$

Donde:

W_i = *Peso inicial*

W_f = *Peso final.*

- **Densidad del cemento.**

El ensayo de densidad del cemento consiste en determinar el peso del cemento por unidad de volumen sin la inclusión de vacíos. Usualmente se realiza mediante el picnómetro o frasco de Le Chatelier, de manera que una cantidad de cemento se introduce en el frasco con líquido (usualmente queroseno o nafta) y se mide el desplazamiento de volumen. Con estos datos se calcula la densidad real del cemento.

Fase II: Determinación de la dosificación del hormigón simple de $f'c = 450 \text{ kg/cm}^2$ a los 28 días de edad y dosificar mezclas de hormigón simple con remplazo parcial del peso del cemento con varios porcentajes de microsilíce.

En la Fase II, se determinó la dosificación de hormigón de $f'c = 450 \text{ kg/cm}^2$ en compresión a los 28 días la cual permitió realizar probetas de hormigón base junto con una nueva dosificación con la utilización de microsilíce en remplazo parcial del cemento:

A. Cálculo de dosificación.

Para la dosificación de la mezcla de hormigón de alta resistencia se empleó el código ACI 211.4R [2], que describe el proceso a realizar para dosificar hormigones de alta resistencia, empleando las propiedades de los materiales se podrá determinar la dosificación óptima según el requerimiento. Dicho esto, es importante mencionar que el hormigón dependerá de los materiales del entorno, por lo que no garantiza con exactitud que la dosificación sea la indicada si los materiales utilizados no son de calidad o no cumplen los requisitos mínimos.

Paso 1.- Seleccionar el asentamiento y resistencia del concreto.

Según las recomendaciones, la TABLA VIII da algunos valores correspondientes al uso de aditivos superplastificantes o no, si se hace uso de estos aditivos se recomienda utilizar un asentamiento de 2 a 4 in, el cual debe generarse antes de añadir el aditivo a la mezcla.

TABLA VIII
ASENTAMIENTO RECOMENDADO PARA HORMIGONES CON Y SIN HRWR (PLASTIFICANTE)

[2].

Hormigón fabricado usando HRWR*	
Asentamiento antes de añadir HRWR (in).	1-2
Hormigón fabricado sin usar HRWR*	
Asentamiento	2-4

*Ajustar el asentamiento deseado en obra mediante la adición de HRWR.

Paso 2.- Selección de tamaño máximo del agregado.

Según ACI 211.4R-93 [2], determina que el tamaño máximo no debe exceder un quinto de la dimensión más angosta de la forma que se utilizará para el hormigón, un tercio de la profundidad de las losas, las tres cuartas partes del espaciamiento mínimo entre paquete de barras o barras individuales, etc. En la TABLA IX, se visualiza los tamaños máximos recomendados.

TABLA IX
AGREGADO GRUESO DE TAMAÑO SUGERIDO. ADAPTACIÓN DE [2] POR AUTOR.

Resistencia del hormigón requerido, psi, kg/ cm ²	Grueso de tamaño máximo sugerido agregado, in.
<9000 psi, 632,7 kg/ cm ²	3/4 a 1
>9000 psi, 632,7 kg/ cm ²	3/8 a 1/2*

*Cuando se usa HRWRA y agregado grueso seleccionado se puede obtener resistencias a compresión de 9000 a 12000 psi, con la utilización de agregado grueso de tamaño máximo nominal de hasta 1 in.

Paso 3.- Selección del contenido óptimo de agregado grueso.

Para la selección del contenido óptimo de agregado grueso se empleó la recomendación de la TABLA X donde en función al tamaño máximo nominal, posterior a la selección del contenido óptimo, se calculó el peso de secado en el horno (OD) por yd³ de hormigón.

TABLA X
VOLUMEN RECOMENDADO DE AGREGADO GRUESO POR UNIDAD DE VOLUMEN DE CONCRETO.
ADAPTACIÓN DE [2] POR AUTOR

Contenido óptimo de agregado grueso para tamaños máximos nominales de agregados que se utilizarán con agregados finos con un módulo de finura de 2,5 a 3,2				
Tamaño nominal máximo, in.	3/8	1/2	3/4	1
Volumen fraccional* de agregado grueso secado al horno (O.D)	0,65	0,68	0,72	0,75

*Los volúmenes se basan en agregados en condición de varillas secas al horno como se describen en ASTM C29/C29M para la utilidad de masa o densidad aparente de los agregados.

Se utilizó la ecuación 17 para el cálculo del peso del árido grueso [2].

$$\text{Peso de árido grueso (O.D)} = (\% \text{ de contenido óptimo} \times \text{DRUW}) \times (27) \quad (7)$$

Donde:

DRUW= Densidad aparente del agregado grueso.

Paso 4.- Estimación del contenido de agua y aire en la mezcla.

Los valores que se tomaron para el contenido de agua y aire que irán dentro de la mezcla se seleccionó en base a la TABLA XI, la cual está en función del asentamiento y el tamaño máximo del agregado utilizado, si se utilizaron aditivos o alguna otra

adición se debe calcular el contenido de agua en base a la relación agua / material cementante.

Los agregados deben estar dentro de los límites descritos por ASTM-C33, para garantizar la calidad y cumplimiento con los valores y características físicas adecuadas para su uso en construcción y elaboración de hormigones.

TABLA XI
PRIMERA ESTIMACIÓN DEL REQUERIMIENTO DE AGUA DE MEZCLADO Y CONTENIDO DE AIRE DEL
CONCRETO RECIÉN MEZCLADO BASADO EN EL USO DE AGREGADO FINO CON 35% DE VACÍOS.
ADAPTACIÓN DE [2] POR AUTOR.

Caída, asentamiento	Mezclas de agua, lb/yd ³ *			
	Agregado grueso de tamaño máximo, in.			
	3/8	1/2	3/4	1
1 a 2	310	295	285	280
2 a 3	320	310	295	290
2 hasta 4	330	320	305	300
Contenido de aire atrapado	3 (2,5) t	2,5(2,0) t	2(1,5) t	1,5(1,0) t

*Los valores dados deben ajustarse para agregados finos con vacíos distintos al 35% usando la ecuación 8.

$$\text{Contenido de vacíos } V, \% = 1 - \frac{\text{Densidad aparente compactada}}{\text{gravedad específica de arena} \cdot 62.4} * 100 \quad (8)$$

Ajuste de agua de mezclado:

Según la normativa el uso de la ecuación 9, brinda un ajuste de agua de 8 lb/yd³ del hormigón de desviación del porcentaje de vacíos distinto a 35 por ciento.

$$\text{Máxima cantidad de agua ajustada, } \frac{\text{lb}}{\text{yd}^3} = (V - 35) \times 8 \quad (9)$$

Paso 5.- Selección de la relación agua / material cementante.

La relación de a/c se utiliza dividiendo el peso del agua de mezclado para el peso combinado del cemento y adición utilizada de otro material cementante de ser necesario, en este caso a/(c+p), recomendada en función al tamaño máximo del agregado.

TABLA XII
RECOMENDACIÓN MÁXIMA DE (A/CM) PARA HORMIGONES ELABORADOS CON Y SIN HRWR.
ADAPTACIÓN DE [2] POR AUTOR

Promedio requerido compresivo fuerza F'cr, psi		a/c							
		Agregado grueso de tamaño máximo, in							
		3/8"		1/2"		3/4"		1"	
		con HRWRA	sin HRWRA	con HRWRA	sin HRWRA	con HRWRA	sin HRWRA	con HRWRA	sin HRWRA
7000	28 días	0,5	0,42	0,48	0,41	0,45	0,4	0,43	0,39
	56 días	0,55	0,46	0,52	0,45	0,48	0,44	0,46	0,43
8000	28 días	0,44	0,35	0,42	0,34	0,42	0,33	0,38	0,33
	56 días	0,48	0,38	0,45	0,37	0,35	0,36	0,4	0,35
9000	28 días	0,38	0,3	0,36	0,29	0,37	0,29	0,34	0,28
	56 días	0,42	0,33	0,39	0,32	0,31	0,31	0,36	0,3
10000	28 días	0,33	0,26	0,32	0,26	0,33	0,25	0,3	0,25
	56 días	0,37	0,29	0,35	0,28	0,27	0,27	0,32	0,26
11000	28 días	0,3	-	0,29	-	0,29	-	0,27	-
	56 días	0,33	-	0,31	-	0,25	-	0,29	-
12000	28 días	0,27	-	0,26	-	0,27	-	0,25	-
	56 días	0,3	-	0,28	-	-	-	0,26	-

$$*F'_{cr} = F'_c + 1400 \text{ psi}$$

El uso de HRWR incrementa la resistencia a la compresión del concreto, lo que en aplicaciones típicas el hormigón de altas resistencias no debe estar sujeto a condiciones de exposición severa.

Paso 6.- Contenido de material cementante.

Para el material cementante, se calcula por yd³ de hormigón, donde se divide la cantidad de agua de mezclado por yd³ del hormigón al factor de relación de a/c del paso 4. La mezcla debe dosificarse para la mayor cantidad de material cementante requerida de no haber una restricción del mismo, Si este supera las 1000 lbs, producirá mezclas más prácticas utilizando materiales diversos o distintos al cemento e incluso otros métodos de dosificación.

Paso 7.- Dosificación básica sin otro material cementante.

Para esta dosificación generalmente, se debe utilizar cemento portland como único material cementante, si se incluye otro material cementante se deberá realizar varias pruebas, ahora bien, los pasos deben ser los siguientes para completar una dosificación base.

- **Contenido de cemento.** - dado que no existe un material cementante distinto al cemento, se usará el peso de cemento calculado en el paso 6.
- **Contenido de arena.** – posteriormente obtenidos todos los pesos por yd³ de hormigón, utilizando el método de volumen absoluto, se restará a 27 ft³ equivalentes a una yd³, la sumatoria del peso del agregado grueso, cemento, agua y porcentaje de aire contenido, dando como resultado el peso de la arena.

Paso 8.- Corrección por humedad.

Es necesario hacer una corrección por humedad a los agregados antes de hacer el hormigón porque la cantidad de agua en los agregados afecta la relación agua-cemento, que es clave para la resistencia, trabajabilidad, y durabilidad del hormigón. Si los agregados tienen exceso de humedad, añadir la cantidad de agua de diseño puede hacer la mezcla demasiado fluida y reducir su resistencia. Por el contrario, si están secos, el hormigón puede quedar rígido y difícil de trabajar. La corrección permite ajustar la cantidad de agua añadida para lograr la mezcla ideal y evitar problemas en la calidad del hormigón final.

Utilizando las ecuaciones 10 y 11 para el cálculo del aporte de humedad de los agregados y así realizar una corrección de la cantidad de agua de los agregados.

- Aporte de humedad de la grava:

$$AP_{Hum-AG} = Grava\ seca * \left(\frac{Gr_{hum} - Gr_{abs}}{100} \right) \quad (10)$$

Donde:

AP_{Hum-AG} = Aporte de humedad del agregado grueso.

Gr_{hum} = Humedad de grava.

Gr_{abs} = Absorción de grava.

- Aporte de humedad de la arena.

$$AP_{Hum-AF} = Arena\ seca * \left(\frac{Ar_{hum} - Ar_{abs}}{100} \right) \quad (11)$$

Donde:

AP_{Hum-AF} = Aporte de humedad del agregado fino.

Ar_{hum} = Humedad de arena.

Ar_{abs} = Absorción de Arena.

Paso 9.- Dosificación de mezclas con aditivo y el número de cilindros.

Se realizó la dosificación de acuerdo a la proporción de números de cilindros a ensayarse, también se realizó una corrección de humedad de los agregados y según las indicaciones del aditivo se incluyó un porcentaje de 1.5 con respecto al peso del cemento.

B. Elaboración de probetas de hormigón base.

Es fundamental realizar testigos o probetas de hormigón base para verificar que la dosificación en la elaboración de hormigones de alta resistencia sea la correcta, ya que esto asegura que el material cumpla con las especificaciones de resistencia y durabilidad requeridas. Estas probetas permiten controlar la calidad del hormigón, detectando posibles errores en la mezcla, y garantizando que las proporciones de los materiales y las condiciones de elaboración sean adecuadas. Esto consiste en preparar moldes cilíndricos (probetas), con hormigón fresco y curado en condiciones controladas [22], después de un tiempo establecido (generalmente 7, 14 y 28 días), las cuales se ensayaron a compresión, tracción indirecta y a su vez el cálculo del módulo de elasticidad, por lo tanto, se comprobó si el hormigón alcanza la resistencia esperada según su diseño.

TABLA XIII
CÓDIGO DE PROBETAS DE ENSAYOS.

Cilindros a compresión para confirmación de la dosificación		
Código	Numero	Días
CC-1	1	7
CC-2	1	7
CC-3	1	14
CC-4	1	28
CC-5	1	28
TI-1	1	28
TI-2	1	28
TI-3	1	28
TI-4	1	28
TI-5	1	28
Total	10	



Fig. 3. Elaboración de probetas de hormigón.



Fig. 4. Desmolde y clasificado de las probetas base.

C. Elaboración de hormigón con distintos porcentajes de microsilíce.

Al obtener la dosificación base de hormigón que se utilizó, se reemplaza la cantidad de cemento con microsilíce, utilizando tres porcentajes distintos basado en la investigación previa [16], [17], [18], los cuales se visualizan en la TABLA I.

a) Propiedades del hormigón en estado fresco.

Conocer las propiedades del hormigón en estado fresco es fundamental porque determina la facilidad de colocación, compactación, y acabado de la mezcla, lo cual impacta directamente en la calidad y durabilidad de la estructura final. Propiedades como la consistencia, trabajabilidad, y densidad permiten asegurar que el hormigón cumpla con las especificaciones de diseño, minimizando problemas de resistencia, homogeneidad, y durabilidad. Este control inicial previene fallas del material a largo plazo y asegura un rendimiento óptimo del hormigón en servicio.

- **Consistencia:**

Este ensayo es fundamental para garantizar que la mezcla mantenga las propiedades deseadas durante el proceso de vertido y en su estado endurecido, por consiguiente, se midió el asentamiento obtenido, lo que llevó a realizar el ensayo de densidad en base a la norma INEN 156 y ASTM C 138-01, con la utilización del cono de Abrams para el cual se realizó un vaciado en tres partes con veinticinco golpes cada una, indicando así su trabajabilidad según su asentamiento [23], [24].

- 1-2 in (Baja trabajabilidad).
- 3-4 in (Media trabajabilidad).
- 5-7 in (alta trabajabilidad).

Verificando así que el hormigón en estado fresco tenga una trabajabilidad y asentamiento adecuados según para la dosificación.



Fig. 5. Proceso de compactación.



Fig. 6. Asentamiento del hormigón.

- **Trabajabilidad:**

Se refiere a la facilidad del manejo y manipulación del concreto en estado fresco, lo que es importante conocer ya que esto permite o restringe ciertos usos, como el bombeo ya que no sería posible si tiene baja trabajabilidad, existen varios factores influyentes como la relación de agua/cementante, agregados y la temperatura, se clasifica como:

- Baja trabajabilidad.
- Media trabajabilidad.
- Alta trabajabilidad.

- **Temperatura:**

Conocer la temperatura del hormigón fresco es crucial porque afecta su tiempo de fraguado, resistencia final y durabilidad. Si el hormigón está demasiado caliente, puede endurecerse más rápido de lo esperado, lo que dificulta su colocación y puede reducir su resistencia y durabilidad a largo plazo debido a una hidratación incompleta. Por otro lado, si está muy frío, el fraguado será lento, lo que puede causar problemas de cohesión y resistencia temprana. Mantener la temperatura en un rango adecuado permite controlar la calidad de la mezcla y evitar problemas estructurales.



Fig. 7. Temperatura del hormigón en estado fresco.

- **Densidad del hormigón.**

La densidad del hormigón es importante porque influye en su resistencia, durabilidad, y en su capacidad para soportar cargas. Un hormigón con la densidad adecuada asegura una buena compactación y una distribución homogénea de los agregados, reduciendo la porosidad y aumentando la resistencia a factores externos

como humedad, ciclos de congelación y deshielo, y cargas pesadas. Además, controlar la densidad ayuda a cumplir con las especificaciones de diseño y asegura que la estructura final tenga el desempeño requerido para su uso previsto [2].

TABLA XIV
CÓDIGO DE PROBETAS DE ENSAYOS DE HORMIGÓN BASE.

Probetas	Densidad del hormigón fresco						
	Dimensión molde		Vol. recipiente	Peso molde vacío	Peso molde+ hormigón fresco	Peso hormigón fresco	Densidad hormigón fresco
	Diámetro	Altura					
	cm	cm	cm ³	g	g	g	g/cm
1	10	20	1570,80	7740	11360	3620	2,30
2	10	20	1570,80	7660	11460	3800	2,42
3	10	20	1570,80	7720	11400	3680	2,34
4	10	20	1570,80	7720	11260	3540	2,25
5	10	20	1570,80	7700	11440	3740	2,38
6	10	20	1570,80	7700	11220	3520	2,24
7	10	20	1570,80	7700	11400	3700	2,36
8	10	20	1570,80	7700	11440	3740	2,38
9	10	20	1570,80	7720	11480	3760	2,39
10	10	20	1570,80	7780	11340	3560	2,27
Promedio							2,33

b) Curado del Hormigón.

Posterior a las 24 horas de elaboración de las probetas estas fueron desmoldadas y sumergidas en agua, con una temperatura controlada de $23,0\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, en la cámara de curado, lo cual asegure un proceso adecuado de curado hasta ser ensayadas [25].



Fig. 8. Curado de probetas de hormigón.

Fase III: Evaluar el desempeño de la resistencia a compresión y tracción indirecta de las distintas muestras de hormigón con diferente porcentaje de microsilíce con el hormigón patrón de 450 kg/cm^2 y módulo de elasticidad teórico.

En la Fase III, mediante ensayos se determinó la resistencia a compresión, tracción indirecta y se calculó el módulo de elasticidad del concreto con dosificación patrón y de $f'_c = 450 \text{ kg/cm}^2$ a los 28 días, comparando el concreto con tres porcentajes distintos de microsílice como remplazo de cemento, lo cual permitió comparar e identificar qué dosificación brinda mejores resultados.

A. Ensayo a compresión.

La finalidad de este método de prueba implica someter cilindros moldeados o núcleos de concreto hidráulico a una carga axial de compresión, aplicándola a una velocidad controlada dentro de un rango establecido de $0,25 \pm 0.05 \text{ MPa/s}$ [26], hasta que el espécimen falle. La resistencia a la compresión se determina dividiendo la carga máxima registrada durante la prueba entre el área de la sección transversal del espécimen [27].

Para la ejecución de este ensayo se utilizó la máquina de ensayo universal de ensayos detallada en la TABLA IV, donde se colocó cada probeta junto a sus bases que permitieran una correcta compresión y se aplicó una carga controlada para cumplir el objetivo de llevar a cada probeta al punto de falla.



Fig. 9. Ensayo a compresión.

B. Ensayo de tracción indirecta.

El ensayo de tracción indirecta, también conocido como ensayo brasileño, es un método empleado para evaluar la resistencia a la tracción de probetas de hormigón.

Este procedimiento de ensayo consiste en aplicar una fuerza de compresión diametral a lo largo del eje longitudinal de una probeta cilíndrica de hormigón, manteniendo una velocidad calculada hasta que ocurra su falla [28]. Esta fuerza genera tensiones de tracción en el plano mientras se encuentran las cargas aplicadas, así como tensiones de compresión elevadas en las zonas adyacentes a la carga [29].

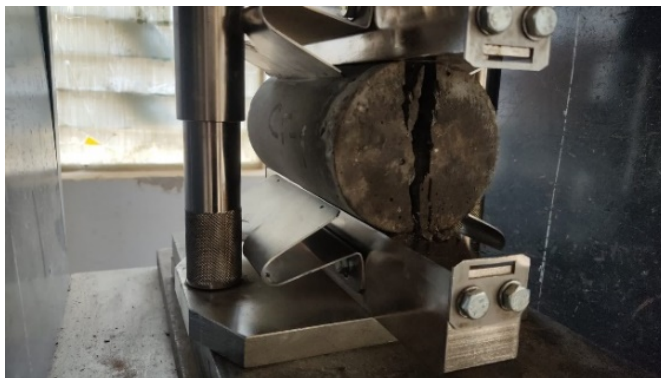


Fig. 10. Ensayo de tracción indirecta.

C. Cálculo del módulo elástico.

El módulo elástico del hormigón es una propiedad mecánica fundamental que se calcula para comprender y predecir el comportamiento del hormigón bajo cargas controladas, se puede determinar mediante ensayos de laboratorio con cilindros con medidas normadas a la edad de 28 días.

Ahora bien, este trabajo se basó en el método teórico donde el American Concrete Institute (ACI) proporciona fórmulas para estimar el módulo de elasticidad del hormigón, especialmente útil para hormigones de alta resistencia, puesto que ya se contaba con los resultados del ensayo a compresión donde el cálculo teórico proporcionará un marco referencial normativo el cual permitirá comparar y validar los resultados obtenidos.

Teóricamente, los módulos de elasticidad varían en función de la velocidad de aplicación de la carga, siendo menores en cargas rápidas y mayores en cargas aplicadas de manera gradual o sostenida, siempre que se mantengan constantes las condiciones del ensayo [30].

Para el cálculo del módulo elástico para un hormigón de alta resistencia se utilizan la ecuación 12 propuestas por ACI-318, la cual tiene aplicaciones para

hormigones de usos generales y la ecuación 13 propuestas por ACI-363, donde hace referencia a su uso únicamente para hormigones de alta resistencia o alto desempeño el cual brinda mayor precisión.

$$Ec_1 = 4700 * \sqrt{f'c} \text{ (MPa)} \quad [31] \quad (12)$$

$$Ec_2 = 3320 * \sqrt{f'c} + 6900 \text{ (MPa)} \quad [11] \quad (13)$$

Donde:

E_c = Módulo elástico del hormigón.

$f'c$ = Resistencia a la compresión del hormigón.

CAPÍTULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

En este capítulo se observarán los resultados de los diferentes ensayos donde se explica mediante fases los resultados obtenidos, para un seguimiento más acertado con lo que respecta a cada objetivo.

I. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.

Para lograr una correcta comparativa entre los diferentes hormigones elaborados se estableció mediante varias operaciones y correcciones de un hormigón patrón, el cual permitió corroborar que la dosificación sea la óptima mediante ensayos a compresión tuviera un rango de 450 kg/cm² a los 28 días de edad, por lo cual se realizaron ensayos previos para garantizar que alcance la resistencia diseñada [26]. Una vez afirmados los resultados, se continuó con los ensayos a compresión, tracción indirecta y el cálculo del módulo de elasticidad, cuyos resultados se establecieron como base comparativa frente a las distintas dosificaciones del hormigón con la utilización del microsílíce en diferentes porcentajes.

Fase I: Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de los agregados finos y gruesos.

a) Propiedades de los agregados

- Granulometría del agregado fino.

TABLA XV
RESULTADOS ANALISIS GRANULOMÉTRIA DE AGREGADO FINO.

ENSAYO: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO EN EL ÁRIDO FINO							
Origen:		Cantera de Baños					
Fecha:		26/08/2024					
Ensayado por:		Erick Ignacio Chancay Andino					
Norma:		NTE INEN 696 / ASTM C 136					
Muestra (g)		857,2	Pérdida de la muestra:		0,17%		
EVALUACIÓN DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN, TRACCIÓN INDIRECTA Y MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA CON LA UTILIZACIÓN DE MICROSÍLICE O HUMO DE SÍLICE							
AGREGADO FINO							
Descripción	Abertura (mm)	Peso retenido (g)	Retenido %	%	%	LÍMITES ESPECIFICADOS	
				Retenido acumulado	PASA	INFERIOR	SUPERIOR
3/8"	9,525	0	0,0	0,0	100,0	100	100
No. 4	4,76	7,3	0,9	0,9	99,1	95	100
No. 8	2,36	96,7	12,1	13,0	87,0	80	100
No. 16	1,18	146,6	18,3	31,4	68,6	50	85
No. 30	0,6	152,4	19,1	50,4	49,6	25	60
No. 50	0,3	189,5	23,7	74,2	25,8	5	30
No. 100	0,15	147,1	18,4	92,6	7,4	0	10
No. 200	0,075	53,0	6,6	99,2	0,8	0	3
BANDEJA		6,4	0,8	100,0	0,0	-	-
TOTAL		799	100	Módulo de finura		2.63	

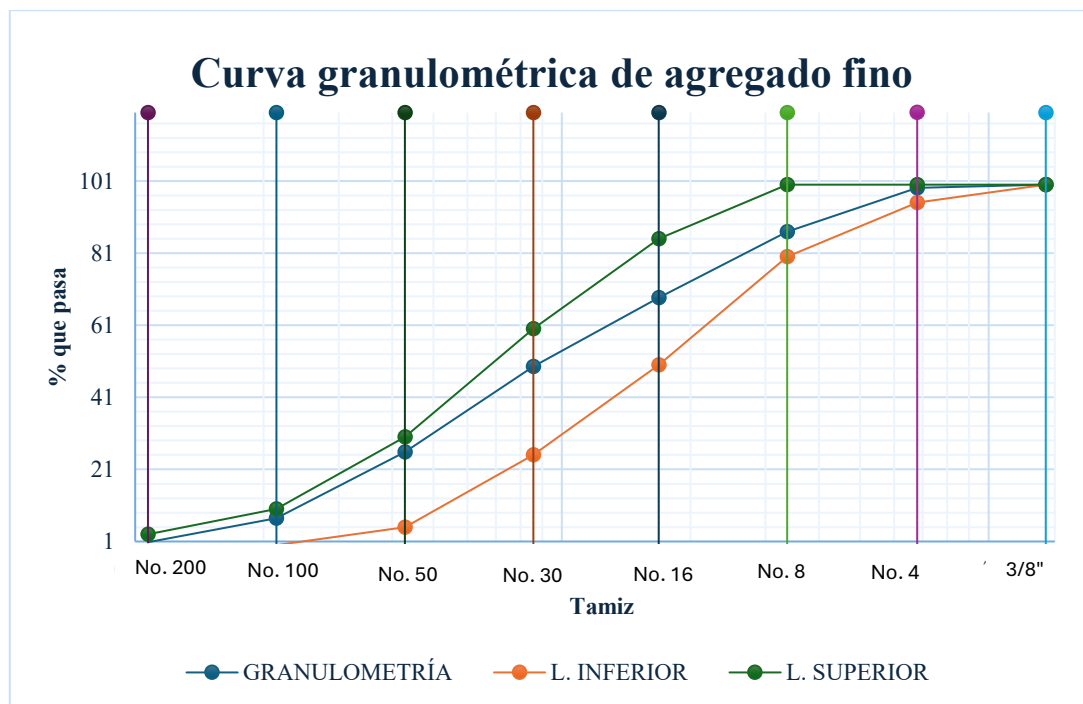


Fig. 111 Granulometría de agregado fino.

Al realizar los ensayos granulométricos del agregado fino (TABLA XV y Fig 11), se puede observar que tiene una variación de tamaños de partículas correcta, la cual está dentro del rango de 2.3 y 3.1 establecido por la norma, obteniendo un valor de módulo de finura de 2.63.

- Granulometría del agregado Grueso.

TABLA XVI
RESULTADOS ANÁLISIS GRANULOMÉTRIA DE AGREGADO GRUESO.

ENSAYO: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO EN EL ÁRIDO GRUESO							
Origen:		Constructora Alvarado					
Fecha:		27/08/2024					
Ensayado por:		Erick Ignacio Chancay Andino					
Norma:		NTE INEN 696 / ASTM C 136					
Muestra (g):		5040,5	Pérdida de la muestra:			0,03%	
PROYECTO: EVALUACIÓN DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN, TRACCIÓN INDIRECTA Y MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA CON LA UTILIZACIÓN DE MICROSÍLICE O HUMO DE SÍLICE							
AGREGADO GRUESO							
Tamiz		Masa retenida (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasa	Límites específicos (% pasa)	
Abertura (mm)						Inferior	Superior
1 1/2	37,5	0	0,0	0,0	100,0	100	100
1 in	25	0	0,0	0,0	100,0	95	100
3/4 in	19	183,1	3,6	3,6	96,4		
1/2 in	12,5	2425	48,1	51,8	48,2	25	60
3/8 in	9,5	994	19,7	71,5	28,5		
No. 4	4,75	1091,6	21,7	93,2	6,8	0	10
Fondo		345,1	6,8	100,0	0,0	0	5
TOTAL:		5038,8	100,0	Módulo de finura		6.68	

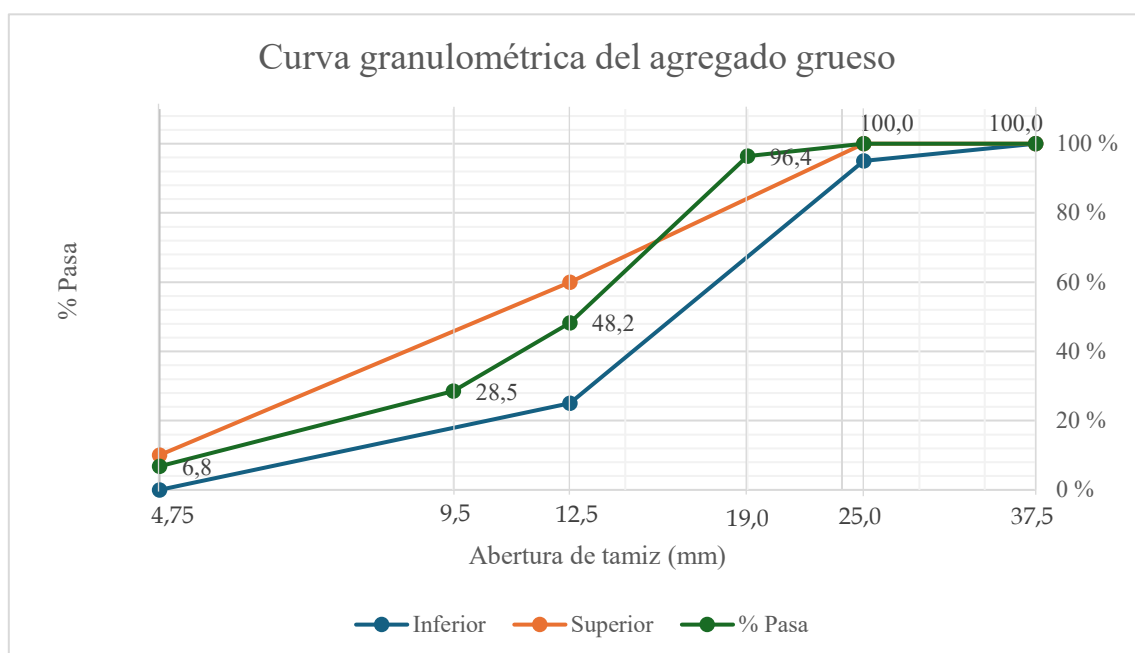


Fig. 122 Granulometría de agregado grueso.

A partir de este ensayo de granulometría del agregado grueso (TABLA XVI y Fig 12), se demostró que este agregado también cumple con los requisitos para la elaboración de hormigón, dado así que el tamaño de las partículas está dentro del rango establecido por la norma y obteniendo un tamaño nominal de $\frac{3}{4}$ ”.

- **Densidad real, relativa y capacidad de absorción del agregado fino.**

TABLA XVII
RESULTADOS DENSIDAD REAL, RELATIVA Y CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO.

ENSAYO: DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA Y ABSORCIÓN DEL ÁRIDO FINO						
Origen:		Cantera de Baños				
Fecha:		28/08/2024				
Ensayado por:		Erick Ignacio Chancay Andino				
Norma:		INEN 856				
PROYECTO: EVALUACIÓN DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN, TRACCIÓN INDIRECTA Y MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA CON LA UTILIZACIÓN DE MICROSÍLICE O HUMO DE SÍLICE						
Descripción		Símbol o	Masa	Unidad	Temperaturas	
Masa de la muestra saturada superficialmente seca (SSS)		[S]	503,30	g	Temperatura de [C]	
Masa del picnómetro + muestra + agua hasta marca de calibración (500ml)		[C]	923,40	g	T= 23 °C	
Masa del picnómetro + agua (T = 23°C ± 2°C) hasta marca de calibración.		[B]	652,20	g	Temperatura de [B]	
Masa de la muestra seca al horno (SH)		[A]	502,30	g	T= 21 °C	
CÁLCULOS						
DENSIDAD RELATIVA (GRAVEDAD ESPECÍFICA)				DENSIDAD		
SECADA AL HORNO				SECADA AL HORNO		
DRSH=	A/(B+S-C)	DRSH = 2,16	DSH=	$998,08 \cdot A / (B+S-C)$	D SH =	2160,00 kg/m³
SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA (SSS)				SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA (SSS)		
DRsss=	S/(B+S-C)	DRSSS = 2,168	DRsss=	$997,62 \cdot S / (B+S-C)$	D SSS =	2163,30 kg/m³
APARENTE				APARENTE		
DRA=	A/(B+A-C)	DRA = 2,173	DRA=	$997,62 \cdot S / (B+A-C)$	D A =	2172,66 kg/m³
PORCENTAJE DE ABSORCIÓN						
Absorción (%) = ((S-A) /A) *100			Absorción (%) =		0,20	%
GRAVEDAD ESPECIFICO DEL AGREGADO FINO DSSS						
2,16			g/cm³			

En el análisis de densidad real, densidad relativa y capacidad de absorción del agregado fino (TABLA XVII), se obtuvo un valor de densidad seca saturada superficial (DSSS) de 2.16 kg/cm³ y una capacidad de absorción del 0.2%. Estos resultados se encuentran dentro del rango permitido para los agregados finos, cumpliendo con los

requisitos establecidos por la normativa correspondiente [1].

- **Densidad real, relativa y capacidad de absorción del agregado grueso.**

TABLA XVIII
RESULTADOS DENSIDAD REAL, RELATIVA Y CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO.

ENSAYO: DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA Y ABSORCIÓN DEL ÁRIDO GRUESO			
Origen:		Constructora Alvarado	
Fecha:		28/08/2024	
Ensayado por:		Erick Ignacio Chancay Andino	
Norma:		INEN 857	
PROYECTO: EVALUACIÓN DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN, TRACCIÓN INDIRECTA Y MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA CON LA UTILIZACIÓN DE MICROSÍLICE O HUMO DE SÍLICE			
REGISTRO DE LECTURAS			
	Descripción	Muestra 1	
	1. Masa de la canastilla vacía	1461,5	g
	2. Masa de la canastilla + ripio en estado SSS	4461,5	g
B	3. Masa en aire del ripio en estado SSS (2-1)	3000	g
	4. Masa de la canastilla sumergida en agua	1043	g
	5. Masa de la canastilla + ripio sumergido en agua	2644	g
C	6. Masa aparente del ripio sumergido en agua (5-4)	1601	g
Árido secado al horno			
	Descripción	Muestra 1	
	7. Masa del recipiente vacío	292	g
	8. Masa del recipiente + ripio en estado seco	3241	g
A	9. Masa en aire del ripio en estado seco	2949	g

TABLA XIX
RESULTADOS DENSIDAD REAL, RELATIVA Y CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO.

LECTURAS PROMEDIO						
Descripción			Símbolo	Masa	Unidad	Temperatura
Masa en aire de la muestra saturada superficialmente seca (SSS)			[B]	3000,00	g	del agua
Masa aparente en agua de la muestra saturada			[C]	1601,00	g	T = 17 °C
Masa en aire de la muestra seca al horno			[A]	2949,00	g	
CÁLCULOS						
DENSIDAD RELATIVA (GRAVEDAD ESPECÍFICA)				DENSIDAD		
SECADA AL HORNO				SECADA AL HORNO		
DRSH= A/ (B-C)	DRSH =	2,10793424	DRSH= 998,86*A/ (B-C)	D SH =	2105,53	kg/m ³
SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA (SSS)				SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA (SSS)		
DRSSS= B/(B-C)	DRSSS =	2,14438885	DRSSS= 998,86*B/(B-C)	D SSS =	2141,94	kg/m ³
APARENTE				APARENTE		
DRA= A/ (A-C)	DRA =	2,18768546	DRA= 998,86*A/ (A-C)	D A =	2185,19	kg/m ³
PORCENTAJE DE ABSORCIÓN						
Absorción (%) = ((B-A) / A) *100			Absorción (%) =		1,729	%
GRAVEDAD ESPECIFICA DEL AGREGADO Grueso DSSS						
2,14			g/cm ³			

En este análisis densidad real, relativa y capacidad de absorción del agregado grueso (TABLA XVIII y TABLA XIX), se calculó un valor de DSSS de 2.14 kg/cm³ y una capacidad de absorción de 1.73 % lo cual está dentro del rango permitido para los agregados finos [21].

- **Densidad del cemento.**

TABLA XX
RESULTADOS DENSIDAD DEL CEMENTO.

ENSAYO: DENSIDAD DEL CEMENTO			
Fecha:	07/09/2024		
Ensayado por:	Erick Ignacio Chancay Andino		
Norma:	INEN 156		
Cemento:	Puzolánico tipo IP “Armaduro”		
PROYECTO: EVALUACIÓN DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN, TRACCIÓN INDIRECTA Y MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA CON LA UTILIZACIÓN DE MICROSÍLICE O HUMO DE SÍLICE			
DESCRIPCIÓN	NOMENCLATURA	VALORES Y CÁLCULOS	
		Muestra 1	Muestra 2
Masa del picnómetro	M1	153,7	153,5
Masa del picnómetro + cemento	M2	218	217,6
Masa del picnómetro + cemento + gasolina hasta 500 cm³	M3	572	570,7
Masa de la gasolina añadida	M4=M3-M2	354	353,1
Masa del picnómetro + 500 cm³ de gasolina	M5	523,6	523
Masa de 500 cm³ de gasolina	M6=M5-M1	369,9	369,5
Densidad de la gasolina	$\rho_g=M6/500\text{ cm}^3$	0,7398	0,739
Masa de la gasolina desplazada por el cemento	M7=M6-M4	15,9	16,4
Masa del cemento	Mc=M2-M1	64,3	64,1
Volumen de gasolina desalojada	$Vc = \frac{M7}{\rho_g}$	21,4922952	22,1921516
DENSIDAD DEL CEMENTO	$\rho c = \frac{Mc(g)}{Vc(cm^3)}$	2,99176981	2,88840854
		2,94	
		Promedio	

El ensayo de densidad del cemento (TABLA XX) dio un valor de 2.94 g/cm³.

- **Ensayo de abrasión.**

TABLA XXI
RESULTADOS ENSAYO DE ABRASIÓN.

ENSAYO: ABRASIÓN		
Origen:	Constructora Alvarado	
Fecha:	11/09/2024	
Ensayado por:	Erick Ignacio Chancay Andino	
Norma:	INEN 860 -ASTM 131	
PROYECTO: EVALUACIÓN DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN, TRACCIÓN INDIRECTA Y MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA CON LA UTILIZACIÓN DE MICROSÍLICE O HUMO DE SÍLICE		
Peso de la muestra	5001	g
MÉTODO	B	
Nº de esferas	11	
Nº de revoluciones	500	
Tiempo de rotación	15	

Tamiz	Peso retenido	Unidad
3/4	2500	g
1/2	2501	g

$$\% \text{Desgaste} = (\text{Pinicial} - \text{Pfinal}) / \text{Pinicial}$$

Descripción	Unidad	
Peso inicial	5001	g
Peso final	3611	g
%DESGASTE	27,794	OK

Mediante el ensayo de abrasión se corroboró que el árido grueso cumple con el rango de desgaste para 3/4" que va desde 10 a 45 % [32], el cual se observa en la TABLA XXI.

- **Densidad aparente, suelta y compactada del agregado grueso.**

TABLA XXII
RESULTADOS ENSAYO DE DENSIDAD APARENTE, SUELTA Y COMPACTADA DEL AGREGADO GRUESO.

ENSAYO: DENSIDAD APARENTE SUELTA Y COMPACTADA DEL AGREGADO GRUESO					
Origen:		Constructora Alvarado			
Fecha:		16/09/2024			
Ensayado por:		Erick Ignacio Chancay Andino			
Norma:		INEN 858			
PROYECTO: EVALUACIÓN DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN, TRACCIÓN INDIRECTA Y MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA CON LA UTILIZACIÓN DE MICROSÍLICE O HUMO DE SÍLICE					
Procedencia del agregado grueso:					
Masa del recipiente vacío =	9956,50	g	Masa del recipiente vacío =	9,96	kg
Volumen del recipiente =	27000,00	cm³	Volumen del recipiente =	0,027000	m³
Material suelto + recipiente:			Material compactado + recipiente:		
Lectura del ensayo 1:	39200,00	g	Lectura del ensayo 1:	42480,00	g
Lectura del ensayo 2:	39289,00	g	Lectura del ensayo 2:	42560,00	g
Promedio =	39244,50	g	Promedio =	42520,00	g
Masa del agregado grueso suelto =	29,29	kg	Masa del agregado grueso compactado =	32,56	kg
Densidad aparente suelta (Ms)			Densidad aparente compactada (Mc)		
Ms =	1084,74	kg/m³	Mc =	1206,06	kg/m³
				1,57481481	g/cm³
				5	

Tras el ensayo de densidad aparente del agregado grueso suelto y compactado se pudo deducir que el valor de densidad aparente compactada fue de 1.57 g/cm³.

- **Densidad aparente, suelta y compactada del agregado fino.**

TABLA XXIII
RESULTADOS ENSAYO DE DENSIDAD APARENTE, SUELTA Y COMPACTADA DEL AGREGADO FINO.

ENSAYO: DENSIDAD APARENTE SUELTA Y COMPACTADA DEL AGREGADO FINO					
Origen:		Mina de Baños			
Fecha:		16/09/2024			
Ensayado por:		Erick Ignacio Chancay Andino			
Norma:		INEN 858			
PROYECTO: EVALUACIÓN DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN, TRACCIÓN INDIRECTA Y MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA CON LA UTILIZACIÓN DE MICROSÍLICE O HUMO DE SÍLICE					
Procedencia del agregado fino:					
Masa del recipiente vacío =	9956,50	g	Masa del recipiente vacío =	9,96	kg
Volumen del recipiente =	27000,00	cm³	Volumen del recipiente =	0,027000	m³
Material suelto + recipiente:			Material compactado + recipiente:		
Lectura del ensayo 1:	37700,00	g	Lectura del ensayo 1:	40660,00	g
Lectura del ensayo 2:	37680,00	g	Lectura del ensayo 2:	40710,00	g
Promedio =	37690,00	g	Promedio =	40685,00	g
Masa del agregado fino suelto =	27,73	kg	Masa del agregado fino compactado =	30,73	kg
Densidad aparente suelta (Ms)			Densidad aparente compactada (Mc)		
Ms =	1027,17	kg/m³	Mc =	1138,09	kg/m³
			1,14 g/cm³		

Al analizar los resultados del ensayo de densidad aparente del agregado fino suelto y compactado se pudo deducir que el valor de densidad aparente compactada fue de 1.14 g/cm³.

- **Contenido de Humedad del agregado fino y grueso.**

TABLA XXIV
RESULTADOS ENSAYO DE CONTENIDO DE HUMEDAD DEL AGREGADO FINO.
ENSAYO: PORCENTAJE DE HUMEDAD DE AGREGADO FINO

ENSAYO: PORCENTAJE DE HUMEDAD DE AGREGADO FINO					
Origen:		Constructora Alvarado			
Fecha:		14/10/2024			
Ensayado por:		Erick Ignacio Chancay Andino			
Norma:		INEN 862			
PROYECTO: EVALUACIÓN DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN, TRACCIÓN INDIRECTA Y MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA CON LA UTILIZACIÓN DE MICROSÍLICE O HUMO DE SÍLICE					
Nomenclatura		Descripción	Unidad	Muestra 1	Muestra 2
m1	masa del recipiente		g	1,85	1,85
m2	masa del recipiente + muestra		g	125,5	124,9
m3=m2-m1	masa de la muestra		g	121,9	121,9
m4	masa del recipiente + muestra seca		g	123,75	123,75
m5=m4-m1	masa de la muestra seca		g	119,8	118,4
CH	contenido de humedad		%	1,788	2,959
CHp	contenido de humedad promedio		%	2,375	

TABLA XXV
RESULTADOS ENSAYO DE CONTENIDO DE HUMEDAD DEL AGREGADO GRUESO.

ENSAYO: PORCENTAJE DE HUMEDAD DE AGREGADO GRUESO					
Origen:		Constructora Alvarado			
Fecha:		14/10/2024			
Ensayado por:		Erick Ignacio Chancay Andino			
Norma:		INEN 862			
PROYECTO: EVALUACIÓN DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN, TRACCIÓN INDIRECTA Y MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA CON LA UTILIZACIÓN DE MICROSÍLICE O HUMO DE SÍLICE					
Nomenclatura		Descripción	Unidad	Muestra 1	Muestra 2
m1		masa del recipiente	g	85	85
m2		masa del recipiente + muestra	g	3106,6	3124,6
m3=m2-m1		masa de la muestra	g	3021,6	3039,6
m4		masa del recipiente + muestra seca	g	3089,7	3107,7
m5=m4-m1		masa de la muestra seca	g	3004,7	3022,7
CH		contenido de humedad	%	0,562	0,559
CHp		contenido de humedad promedio	%	0,5605	

Para este ensayo se utilizó dos muestras de cada agregado lo cual permitió establecer un contenido de humedad promedio para cada agregado, lo que brindó en el agregado grueso un porcentaje de humedad de 0.56% y en el agregado fino un porcentaje de 2.38%.

Fase II: Determinación de la dosificación del hormigón simple de $f'c = 450 \text{ kg/cm}^2$ a los 28 días de edad y dosificar mezclas de hormigón simple con remplazo parcial del peso del cemento con varios porcentajes de microsílice.

- **Cálculo de dosificación patrón por el método ACI.**

Al elaborar hormigones de alta resistencia, es fundamental considerar que el diseño debe apuntar a una resistencia superior a la especificada. Para definir una resistencia característica adecuada para el diseño de la dosificación, es necesario evaluar tanto las propiedades de los materiales disponibles para la mezcla como los resultados previos obtenidos en laboratorio con esos mismos materiales.

Una resistencia especificada de 45 MPa supera el valor de referencia indicado por el comité ACI para clasificar un hormigón como de alta resistencia. Una vez fabricado, se realizan diversos ensayos para determinar con precisión la resistencia obtenida, además de pruebas que verifican que la dosificación utilizada garantiza un desempeño adecuado de los materiales empleados en la mezcla.

El código ACI 211.4R-98 ofrece una guía para la dosificación de materiales con cemento Portland. Por su parte, el ACI 363.2R-98 establece directrices para la selección de materiales y el control estricto necesario en la producción de hormigones de alta resistencia, abarcando desde la fabricación hasta la distribución y el curado. En la selección de materiales, se analizan las características de cada componente para optimizar la producción de un hormigón económicamente eficiente, estructuralmente adecuado y de calidad garantizada.

Los hormigones de alta resistencia se distinguen no solo por las particularidades en la selección de materiales, mezclado, producción y control del curado, sino también por la resistencia final que se determina a través de ensayos de laboratorio. El ACI 214R-02 detalla el procedimiento adecuado para realizar un análisis estadístico preciso de los resultados obtenidos.

TABLA XXVI
ESFUERZO DE DISEÑO PARA DOSIFICACIÓN.

DATOS						
$f'c =$	6500	Psi	456,995	kg/cm ²	45	MPa

TABLA XXVII
DATOS DE AGREGADO FINO.

Agregado fino Cantera de Baños

Gravedad específica (DSSS)		Densidad aparente compactada	
g/cm ³	lb/ft ³	g/cm ³	lb/ft ³
2,16	134,8	1,51	94,2
Absorción%	Humedad%	M.F	
0,20	2,38	2,62	

TABLA XXVIII
DATOS DE AGREGADO FINO.

Agregado grueso Alvarado

Gravedad específica (DSSS)		Densidad aparente compactada	
g/cm ³	lb/ft ³	g/cm ³	lb/ft ³
2,14	133,6	1,57	98
Absorción%	Humedad%	M.F	
1,73	0,56	6,68	

TABLA XXIX
DATOS DE MATERIAL CEMENTANTE.

Cemento Armaduro

Densidad	
g/cm ³	lb/ft ³
2,9	181,04

Paso 1.- Seleccionar el asentamiento y resistencia del concreto.

Según las recomendaciones en la TABLA VIII, se recomienda utilizar un asentamiento de 2 a 4 in, el cual debe generarse antes de añadir el aditivo a la mezcla.

Asentamiento elegido de: 2 in.

Paso 2.- Selección de tamaño máximo del agregado.

En la TABLA IX, se logra visualizar los tamaños máximos recomendados.

TNM: ¾ in (19 mm).

Paso 3.- Selección del contenido óptimo de agregado.

El contenido óptimo de agregado grueso se visualiza la TABLA X donde en

función al tamaño máximo nominal, posterior a la selección del contenido óptimo de la TABLA X, recomendado el módulo de finura del agregado grueso de $\frac{3}{4}$ " a 1".

Módulo de finura de la arena: 2.62

Factor fraccional del agregado grueso: 0.72

Según la TABLA X.

Peso del árido grueso secado al horno O.D = $(0.72 \times 98 \text{ lb/ft}^3 \times 27 \text{ ft}^3)$

O.D = 1905.1 lb

Paso 4.- Estimación del contenido de agua y aire en la mezcla.

Según la TABLA XI, que depende del asentamiento y el tamaño máximo del agregado utilizado, si se usan aditivos o algún otro añadido se calculará el contenido de agua según la relación agua/material cementante.

Asentamiento: 1 in.

TNM = $\frac{3}{4}$ in (19 mm).

De la Tabla XI:

Mezcla de agua: 285 lb/yd³

Contenido de aire atrapado: 2.0 %

$$\text{Contenido de vacíos } V, \% = 1 - \frac{\text{Densidad aparente compactada}}{\text{gravedad específica de arena} \times 62.4} \times 100 \quad (14)$$

$$V, \% = 1 - \frac{94.2}{2.16 \times 62.4} \times 100$$

$$V, \% = 30.12 \%$$

Dado que existe un resultado diferente de 35 %, se realizó un ajuste del contenido de agua con la utilización de la ecuación 15.

$$\text{Máxima cantidad de agua ajustada, } \frac{\text{lb}}{\text{yd}^3} = (V - 35) \times 8 \quad (15)$$

$$\text{Máxima cantidad de agua ajustada, } \frac{\text{lb}}{\text{yd}^3} = (30.12 - 35) \times 8 = -39.05 \text{ lb/yd}^3$$

Lo que llevó a una corrección de agua de la siguiente manera.

$$\text{Agua de mezclado corregida} = 285 \text{ lb/yd}^3 - 39.05 \text{ lb/yd}^3$$

$$\text{Agua de mezclado corregida} = \underline{245.95 \text{ lb/yd}^3}$$

Paso 5.- Selección de la relación agua / material cementante.

La relación de a/c se utiliza dividiendo el peso del agua de mezclado para el peso combinado del cemento y adición utilizada de otro material cementante de ser necesario, en este caso $a/(c+p)$, recomendada en función al tamaño máximo del agregado.

Con los valores obtenidos de:

$$f'_{cr} = \frac{f'_c + 1400}{0.90}$$

$$f'_{cr} = 8800 \text{ Psi}$$

$$* f'_{cr} = 8800 \text{ Psi} * 0.9$$

$$* f'_{cr} = 7920 \text{ Psi}$$

Según los valores de la TABLA XII, se obtuvo los valores de la relación agua-cemento, por lo que se realizó una interpolación, dado que el valor obtenido no se encuentra directamente en la tabla.

Valores de interpolación:

TABLA XXX
VALORES PARA INTERPOLAR

f'cr	Factor
7000	0,45
8000	0,4

TABLA XXXI
VALOR DE INTERPOLACIÓN

Interpolación	7920	0,404
---------------	------	-------

Paso 6.- Contenido de material cementante.

Se calculó por yd³ de hormigón, aquí se divide la cantidad de agua de mezclado por yd³ del hormigón al factor de relación de a/c del paso 4.

$$c = \frac{a}{a/c} = \left(\frac{245,95}{0,404} \right) = 608.8 \text{ lb} \quad (16)$$

Paso 7.- Dosificación básica de la mezcla sin otro material cementante.

- **Cantidad de cemento para una yd³.**

$$C = 608.8 \text{ lb}$$

Densidad del cemento.

$$\text{Densidad} = 181.04 \text{ lb/ft}^3$$

- **Peso específico de Agregado grueso.**

$$\text{Ag grueso} = 133.6 \text{ lb/ft}^3$$

- **Peso específico de Agregado fino.**

$$\text{Ag fino} = 134.8 \text{ lb/ft}^3$$

Contenido de cemento: Como no se usan otros materiales cementantes, su peso es igual al del material calculado en el paso 6.

Se procedió a calcular el volumen en ft³ para una yd³, dividiendo la cantidad de los materiales por su peso específico para el agregado fino y densidad del cemento, para el volumen de aire se multiplico el 2% al ser el valor seleccionado por 27ft³.

TABLA XXXII
VOLUMEN DE MATERIALES PARA UNA Yd³

Vol. cemento	3,36	ft ³
Vol. Ag grueso	14,26	ft ³
Vol. H₂O	3,95	ft ³
Vol. Aire	0,54	ft ³
Vol. Total	22,11	ft ³

Contenido de arena. Se realizó la dosificación básica para una unidad de volumen de 1yd³ equivalente a 27ft³.

$$27 \text{ ft}^3 - 22.11 \text{ ft}^3 = 4.89 \text{ ft}^3$$

Lo que es equivalente por yd³ al peso requerido:

$$4.89 \text{ ft}^3 \times 134 \text{ lb/ft}^3 = 659.124 \text{ lb}$$

Cantidad de materiales para 1 yd³.

TABLA XXXIII
CANTIDAD DE MATERIALES EN LB Y KG

CANTIDAD [lb]		CANTIDAD [Kg]	
Cemento	608,8	Cemento	276,73
Arena	659,1	Arena	299,59
Ripio	1905,1	Ripio	865,95
Agua con aditivo	245,9	Agua con aditivo	111,77

TABLA XXXIV
DOSIFICACIÓN DE MATERIALES

DOSIFICACIÓN			
A/C	C	A	R
0,4	1	1,08	3,13

- Determinación de cantidad de materiales para 10 probetas.**

En este caso, si el árido grueso es de ¾ de pulgada (aproximadamente 19 mm), el cilindro debe tener un diámetro de al menos 10 cm (100 mm), lo que cumple con esta relación y permite obtener resultados representativos y precisos en la prueba de resistencia a la compresión [26].

Volumen de cilindros.

Altura: 20 cm

Diámetro: 10 cm

Volumen:

$$V_{cilindro} = \frac{\pi x D^2}{4} x H$$

$$V = 1570.80 \text{ cm}^3$$

Al sumar la cantidad de materiales en kg a utilizar representados en la TABLA XXXIII, obtuvo un valor de 1554.05 kg y realizó la conversión a Ton/m³.

Se obtuvieron los siguientes valores.

Densidad del hormigón fresco: 2.24 Ton/m³.

Para el cálculo de cantidad de hormigón para un cilindro.

Vol. cilindro x Densidad de hormigón fresco.

Masa del cilindro: 3.44 kg

Masa adoptada: 3.5 kg

Cantidad de hormigón.

Cilindros: 10

Cantidad: 35 kg

$$0.4x + 1x + 1.08x + 3.13x = 35 \text{ kg}$$

$$X = 6.24 \text{ kg}$$

Dosificación inicial para 35 kg.

TABLA XXXV		
DOSIFICACIÓN PARA 35 kg		
Dosificación para 35 kg		
MATERIAL	PESO (kg)	Dosificación
AGUA	2,50	0,4
CEMENTO	6,24	1
ARENA	6,74	1,08
RIPIO	19,53	3,13

Paso 8.- Corrección por humedad.

Es necesario hacer una corrección por humedad a los agregados antes de hacer el hormigón porque la cantidad de agua en los agregados afecta la relación agua/cemento, que es clave para la resistencia, trabajabilidad, y durabilidad del hormigón. Si los agregados tienen exceso de humedad, añadir la cantidad de agua de diseño puede hacer la mezcla demasiado fluida y reducir su resistencia. Por el contrario, si están secos, el hormigón puede quedar rígido y difícil de trabajar. La corrección permite ajustar la cantidad de agua añadida para lograr la mezcla ideal y evitar problemas en la calidad del hormigón final.

Se utilizó las ecuaciones 16 y 17 para el cálculo del aporte de humedad de los agregados y así realizar una corrección de la cantidad de agua de los agregados.

- Aporte de humedad de la grava

$$AP_{Hum-AG} = Grava\ seca * \left(\frac{Gr_{hum} - Gr_{abs}}{100} \right) \quad (17)$$

- Aporte de humedad de la arena.

$$AP_{Hum-AF} = Arena\ seca * \left(\frac{Ar_{hum} - Ar_{abs}}{100} \right) \quad (18)$$

Paso 9.- Dosificación de mezclas con aditivo y el número de cilindros.

Se realizó la dosificación de acuerdo con la proporción de números de cilindros a ensayarse, también se realizó una corrección de humedad de los agregados y de acuerdo a las indicaciones del aditivo se incluyó un porcentaje de 1.5 con respecto al peso del cemento.

A continuación, en la TABLA XXXVI se visualiza la dosificación del hormigón base con la utilización del método de ACI.

TABLA XXXVI
DOSIFICACIÓN DE HORMIGÓN BASE PARA 35 Kg.

Material	Dosificación	Peso (kg)
Agua	0,41	2,58
Cemento	1,00	6,24
Arena	1,11	6,90
Ripio	3,15	19,64
Aditivo	0,02	0,0936

Dosificación del hormigón con porcentajes del 3%, 8% y 12%.

Una vez definida la dosificación base, se procedió a realizar el reemplazo parcial del cemento con microsilíce en diferentes proporciones. Para cada porcentaje de reemplazo, se elaboraron 15 probetas, garantizando así la representatividad y confiabilidad de los ensayos posteriores de las cuales únicamente 10 preseleccionadas para ensayar. Estas probetas fueron preparadas siguiendo estrictamente las normas establecidas, con el objetivo de evaluar el impacto de la microsilíce en las propiedades mecánicas del hormigón.

TABLA XXXVII
DOSIFICACIÓN DE HORMIGÓN CON TRES PORCENTAJES DE MICROSILICE.

Dosificación 3%		Dosificación 8%		Dosificación 12%	
Material	Peso (kg)	Material	Peso (kg)	Material	Peso (kg)
Agua	2,58 Lt	Agua	2,58 Lt	Agua	2,58 Lt
Cemento	6,05	Cemento	5,74	Cemento	4,992
Microsilíce	0,1872	Microsilíce	0,4992	Microsilíce	0,7488
Arena	6,90	ARENA	6,90	Arena	6,90
Ripio	19,64	RIPIO	19,64	Ripio	19,64
Aditivo	0,0936	Aditivo	0,09	Aditivo	0,09

Propiedades del hormigón en estado fresco.

Estas propiedades deben ser controladas mediante ensayos normalizados para asegurar que la mezcla cumpla con las especificaciones del diseño, evitando problemas como segregación, exudación o pérdida de resistencia, lo que contribuye a la optimización del proceso constructivo y a la longevidad de la estructura.

- Hormigón patrón.

TABLA XXXVIII
PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO DEL HORMIGÓN PATRÓN.

Propiedades en estado fresco probetas patrón	
Propiedades	Probetas patrón
Asentamiento (in)	1
Trabajabilidad	Baja trabajabilidad
Temperatura	19°C

- Hormigón con remplazo del 3% del cemento.

TABLA XXXIX
PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO DEL HORMIGÓN 3%.

Propiedades en estado fresco Probetas 3%	
Propiedades	Probetas 3%
Asentamiento (in)	1
Trabajabilidad	Baja trabajabilidad
Temperatura	21°C

- Hormigón con remplazo del 8% del cemento.

TABLA XL
PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO DEL HORMIGÓN 8%.

Propiedades en estado fresco Probetas 8%	
Propiedades	Probetas 8%
Asentamiento (in)	1
Trabajabilidad	Baja trabajabilidad
Temperatura	23°C

- Hormigón con remplazo del 12% del cemento.

TABLA XLI
PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO DEL HORMIGÓN 12%.

Propiedades en estado fresco Probetas 12%	
Propiedades	Probetas 12%
Asentamiento (in)	1
Trabajabilidad	Baja trabajabilidad
Temperatura	23°C

Se ha observado que los hormigones en estado fresco presentan una trabajabilidad reducida, atribuida al bajo porcentaje de agua utilizado en su elaboración, una condición inherente al diseño de hormigón de alta resistencia. Además, se evidencia que algunas de sus propiedades son similares o incluso idénticas, lo que confirma la

coherencia en el comportamiento de las mezclas analizadas.

Fase III: Evaluar el desempeño de la resistencia a compresión y tracción indirecta de las distintas muestras de hormigón con diferente porcentaje de microsilice con el hormigón patrón de 450 kg/cm² y módulo de elasticidad teórico.

Codificación de probetas.

La codificación de las probetas de hormigón según el ensayo y la dosificación es fundamental para garantizar un correcto seguimiento y clasificación en la investigación. Esto permite identificar con precisión cada muestra, evitar errores en la recolección de datos y asegurar una comparación adecuada de los resultados. Además, facilita la organización del estudio, optimiza el análisis de las propiedades mecánicas y contribuye a la trazabilidad de los ensayos, asegurando la fiabilidad y reproducibilidad de la investigación.

TABLA XLII
DOSIFICACIÓN DE HORMIGÓN PATRÓN Y CON TRES PORCENTAJES DE MICRO SÍLICE.

CODIFICACIÓN DE PROBETAS								
Numero	PATRÓN		3 % DE MICROSÍLICE		8 % DE MICROSÍLICE		12 % DE MICROSÍLICE	
	Código	Edad	Código	Edad	Código	Edad	Código	Edad
1	CC-1	28	CC-1	28	CC-1	28	CC-1	28
2	CC-2	28	CC-2	28	CC-2	28	CC-2	28
3	CC-3	28	CC-3	28	CC-3	28	CC-3	28
4	CC-4	28	CC-4	28	CC-4	28	CC-4	28
5	CC-5	28	CC-5	28	CC-5	28	CC-5	28
6	TI-1	28	TI-1	28	TI-1	28	TI-1	28
7	TI-2	28	TI-2	28	TI-2	28	TI-2	28
8	TI-3	28	TI-3	28	TI-3	28	TI-3	28
9	TI-4	28	TI-4	28	TI-4	28	TI-4	28
10	TI-5	28	TI-5	28	TI-5	28	TI-5	28

Resistencia a compresión.

Para verificar el cumplimiento de las especificaciones, se estableció como parámetro una resistencia mínima de 450 kg/cm². Este criterio permitió evaluar si las muestras analizadas alcanzaron el nivel requerido de resistencia a compresión, asegurando así la calidad y el desempeño del hormigón en función de los estándares

establecidos

- **Probetas patrón de 450kg/cm² a los 28 días de edad.**

TABLA XLIII
RESISTENCIA DEL HORMIGÓN PATRÓN.

Resistencia a la compresión a los 28 días de edad						
Código Probetas	Resistencia de probetas prueba	Área (Cm ²)	Max fuerza (KN)	Max fuerza Axial (MPa)	Resistencia a compresión (kg/cm ²)	Resistencia a compresión (kg/cm ²) promedio
CC-1	450 kg/cm ²	78,54	333,3	42,43	432,86	451,24
CC-2		78,54	347,2	44,20	450,91	
CC-3		78,54	343,3	43,71	445,84	
CC-4		78,54	353,2	44,97	458,70	
CC-5		78,54	360,3	45,87	467,92	

El ensayo de compresión del hormigón patrón arrojó valores entre 433 kg/cm² y 468 kg/cm², con un promedio de 451 kg/cm². Esto indica una resistencia uniforme dentro de un rango estrecho, lo que sugiere una mezcla homogénea y un adecuado proceso de curado y compactación.

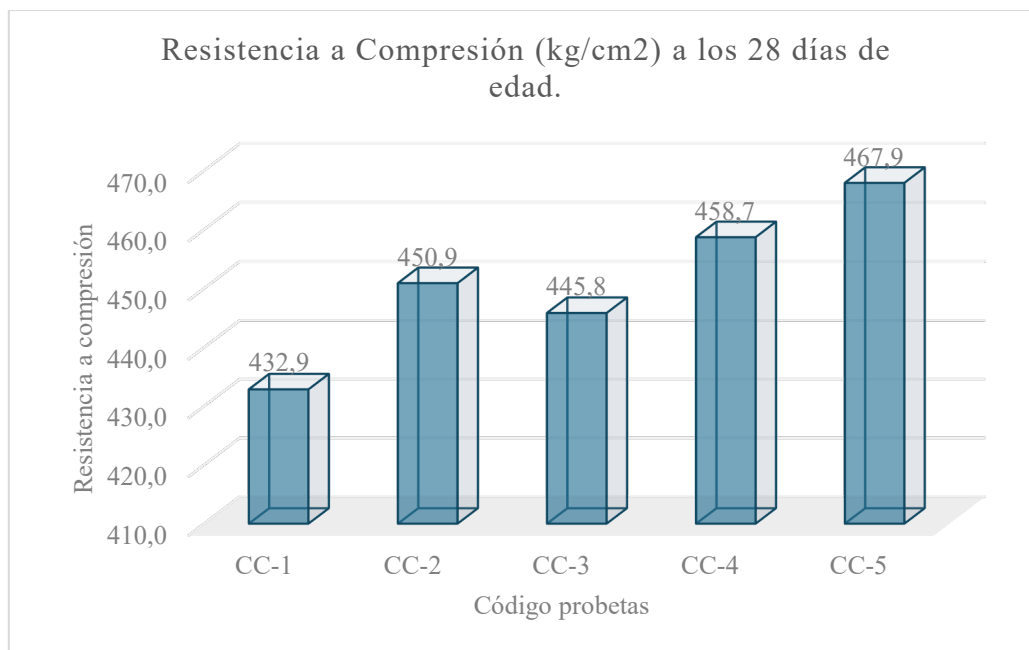


Fig. 13. Valores de compresión

Probetas con 3% de microsilíce a los 28 días de edad.

TABLA XLIV
RESISTENCIA DEL HORMIGÓN CON MICROSILICE AL 3%.

Resistencia a la compresión a los 28 días de edad 3% de microsilíce						
Código Probetas	Resistencia de diseño	Área (Cm ²)	Max fuerza (KN)	Max fuerza Axial (MPa)	Resistencia a compresión (kg/cm ²)	Resistencia a compresión (kg/cm ²) promedio
3%CC-1	450 kg/cm ²	78,54	444,3	56,57	577,01	568,91
3%CC-2		78,54	436,2	55,53	566,49	
3%CC-3		78,54	412,3	52,49	535,45	
3%CC-4		78,54	444,2	56,55	576,88	
3%CC-5		78,54	453,3	57,71	588,70	

El ensayo de compresión del hormigón con 3% de microsilíce mostró valores entre 535 kg/cm² y 589 kg/cm², con un promedio de 569 kg/cm². Estos resultados reflejan una resistencia elevada y uniforme, indicando una buena calidad del material y un adecuado proceso de dosificación, curado y compactación.

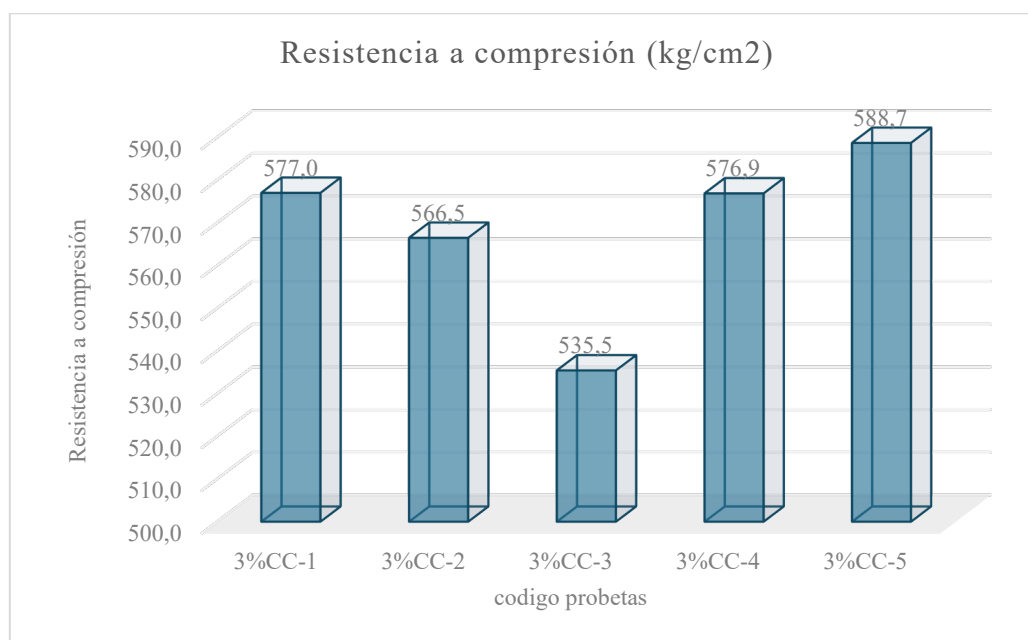


Fig. 134. Valores de resistencia a la compresión con 3%.

- **Probetas con 8% de microsilíce a los 28 días de edad.**

TABLA XLV
RESISTENCIA DEL HORMIGÓN CON MICROSILICE AL 8%.

Resistencia a la compresión a los 28 días de edad 8% de microsilíce						
Código Probetas	Resistencia de diseño	Área (Cm ²)	Max fuerza (KN)	Max fuerza Axial (MPa)	Resistencia a compresión (kg/cm ²)	Resistencia a compresión (kg/cm ²) promedio
3%CC-1	450 kg/cm ²	78,54	320,3	40,78	415,97	424,23
3%CC-2		78,54	336,2	42,80	436,62	
3%CC-3		78,54	306,3	38,99	397,79	
3%CC-4		78,54	323,2	41,15	419,74	
3%CC-5		78,54	347,3	44,22	451,04	

El ensayo de compresión del hormigón con 8% de microsilíce presentó valores entre 398 kg/cm² y 451 kg/cm², con un promedio de 424 kg/cm². Estos resultados muestran una resistencia consistente dentro de un rango moderado, lo que indica una adecuada calidad del material y un proceso controlado de mezclado y curado.

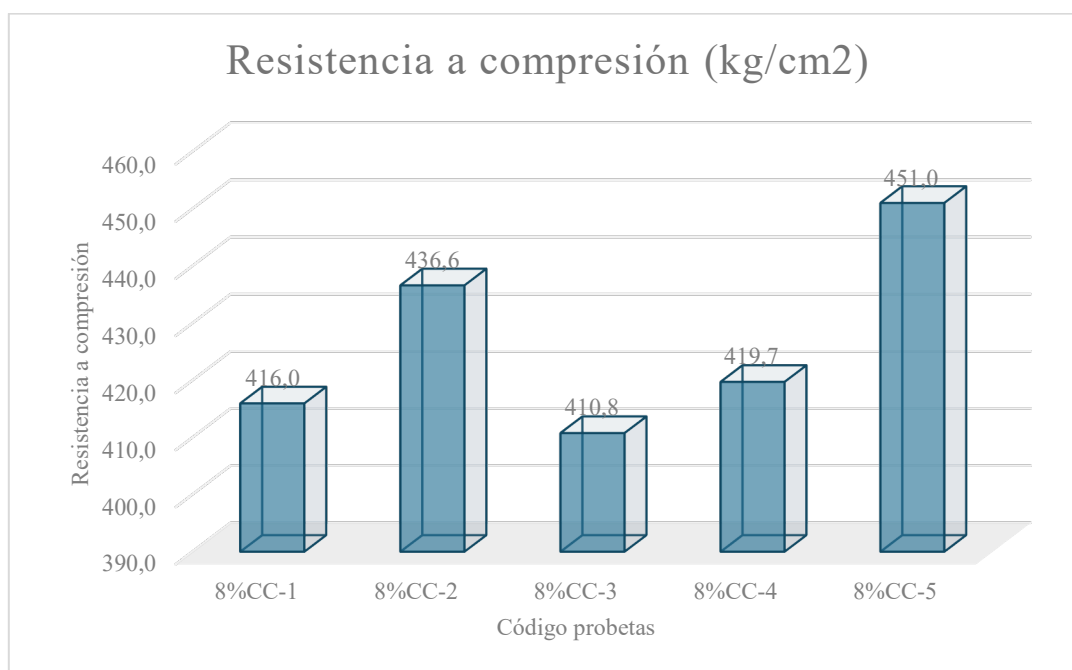


Fig. 145. Valores de resistencia a la compresión con 8%.

- **Probetas con 12% de microsilíce a los 28 días de edad.**

TABLA XLVI
RESISTENCIA DEL HORMIGÓN CON MICROSÍLICE AL 12%.

Resistencia a la compresión a los 28 días de edad 12% de microsilíce						
Código Probetas	Resistencia de diseño	Área (Cm ²)	Max fuerza (KN)	Max fuerza Axial (MPa)	Resistencia a compresión (kg/cm ²)	Resistencia a compresión (kg/cm ²) promedio
3%CC-1	450 kg/cm ²	78,54	302,3	38,49	392,60	406,05
3%CC-2		78,54	319,2	40,64	414,55	
3%CC-3		78,54	315,3	40,15	409,48	
3%CC-4		78,54	318,2	40,51	413,25	
3%CC-5		78,54	308,3	39,25	400,39	

El ensayo de compresión del hormigón con 12% de microsilíce registró valores entre 393 kg/cm² y 415 kg/cm², con un promedio de 406 kg/cm². Estos resultados reflejan una resistencia estable y dentro de un rango controlado, lo que indica una mezcla uniforme y un adecuado proceso de curado y compactación.

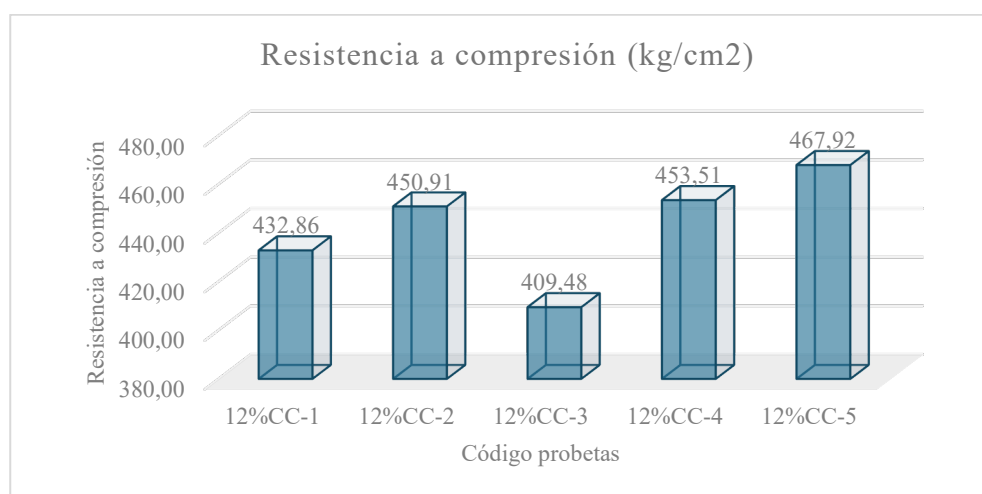


Fig. 16. Valores de resistencia a la compresión con 12%.

Finalmente, en la Fig.17 se logra observar que la dosificación con mejor resultado y comportamiento frente a la aplicación de esfuerzos a compresión es la que tiene un remplazo parcial del cemento con microsilíce del 3%.

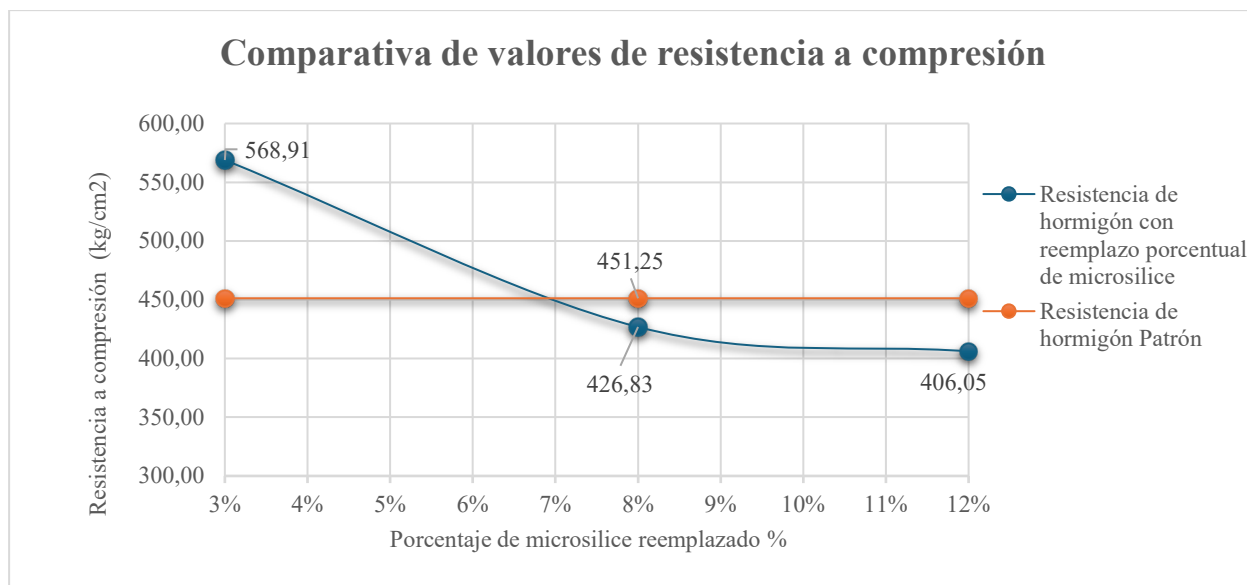


Fig. 157. Valores comparativos de las diferentes dosificaciones.

Resistencia a la tracción indirecta.

A continuación, se presentan los resultados del ensayo de tracción indirecta y comparar los resultados de tres dosificaciones con la del hormigón base permite identificar el impacto de la incorporación de nuevos materiales, como la microsilice, en su comportamiento mecánico y así se determinó cuál dosificación mejora la resistencia a la tracción, optimizando la mezcla para aplicaciones estructurales más seguras y eficientes.

- **Probetas patrón de 450kg/cm² a los 28 días de edad.**

TABLA XLVII
RESISTENCIA DEL HORMIGÓN PATRÓN.

Resistencia a la tracción indirecta a los 28 días de edad							
Código Probetas	Área (Cm ²)	Max fuerza (KN)	Max fuerza Axial (MPa)	Resistencia a compresión indirecta (kg/cm ²)	Resistencia a compresión indirecta (kg/cm ²) promedio	Resistencia a compresión Promedio(kg/cm ²)	Relación con la resistencia a compresión (%)
TI-1	78,54	84,5	10,76	109,74	123,21	451	27,31
TI-2	78,54	132	16,81	171,43			
TI-3	78,54	76,9	9,79	99,87			
TI-4	78,54	86,1	10,96	111,82			

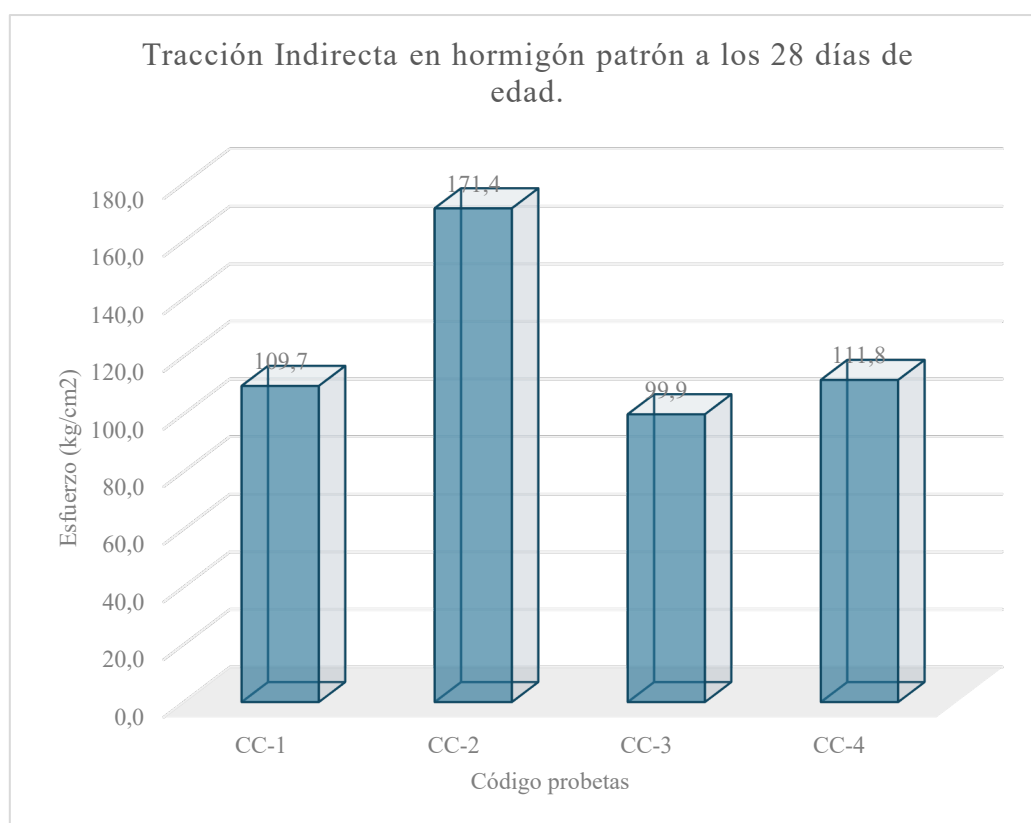


Fig. 168. Valores de tracción indirecta del hormigón base.

- **Probetas con 3% de microsilíce a los 28 días de edad.**

TABLA XLVIII
RESISTENCIA DEL HORMIGÓN CON MICROSÍLICE AL 3%.

Resistencia a la tracción indirecta a los 28 días de edad 3% de microsilíce							
Código Probetas	Área (Cm ²)	Max fuerza (KN)	Max fuerza Axial (MPa)	Resistencia a compresión indirecta (kg/cm ²)	Resistencia a compresión indirecta (kg/cm ²) promedio	Resistencia a compresión Promedio(kg/cm ²)	Relación con la resistencia a compresión (%)
3%TI-1	78,54	131,79	16,78	171,16	160,17	569	28,15
3%TI-2	78,54	132,65	16,89	172,27			
3%TI-3	78,54	100,44	12,79	130,44			
3%TI-4	78,54	128,44	16,35	166,81			

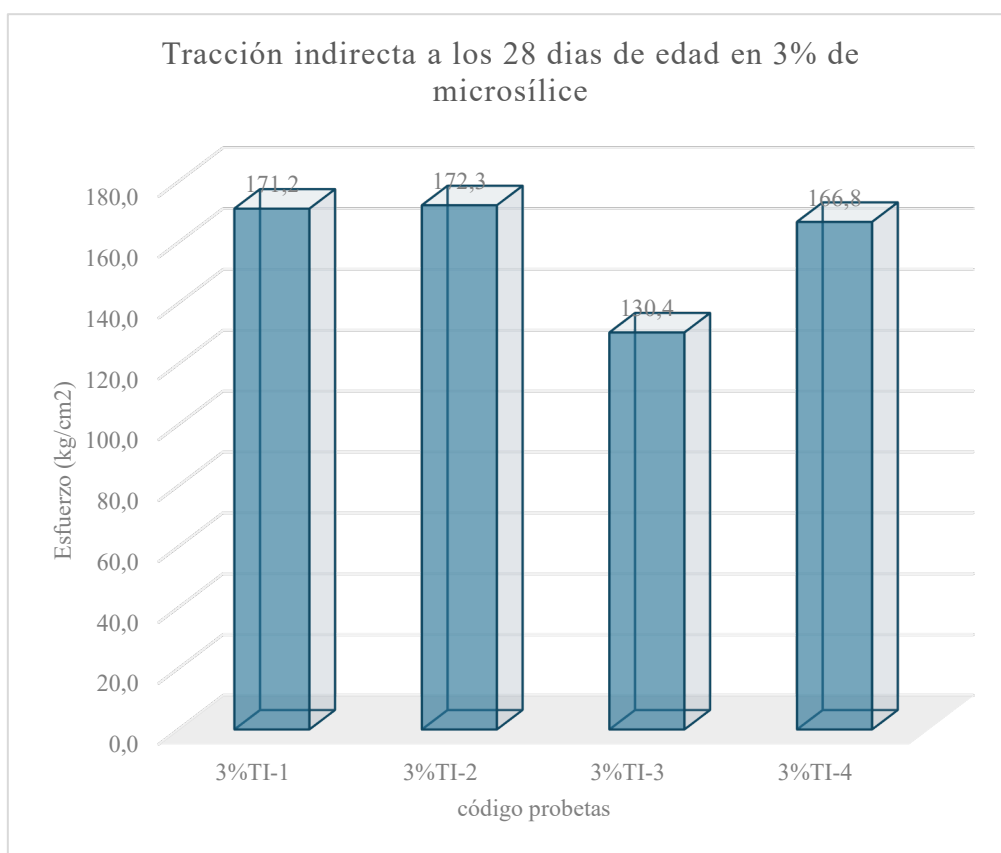


Fig. 1917. Valores de tracción indirecta del hormigón con el 3% de microsilíce.

- **Probetas con 8% de microsilíce a los 28 días de edad.**

TABLA XLIX
RESISTENCIA DEL HORMIGÓN CON MICROSÍLICE AL 8%.

Resistencia a la tracción indirecta a los 28 días de edad 8% de microsilíce							
Código Probetas	Área (Cm ²)	Max fuerza (KN)	Max fuerza Axial (MPa)	Resistencia a compresión indirecta (kg/cm ²)	Resistencia a compresión indirecta (kg/cm ²) promedio	Resistencia a compresión Promedio(kg/cm ²)	Relación con la resistencia a compresión (%)
8%TI-1	78,54	95,46	12,15	123,97	119,38	427	27,97
8%TI-2	78,54	86,20	10,98	111,94			
8%TI-3	78,54	82,89	10,55	107,65			
8%TI-4	78,54	103,14	13,13	133,95			

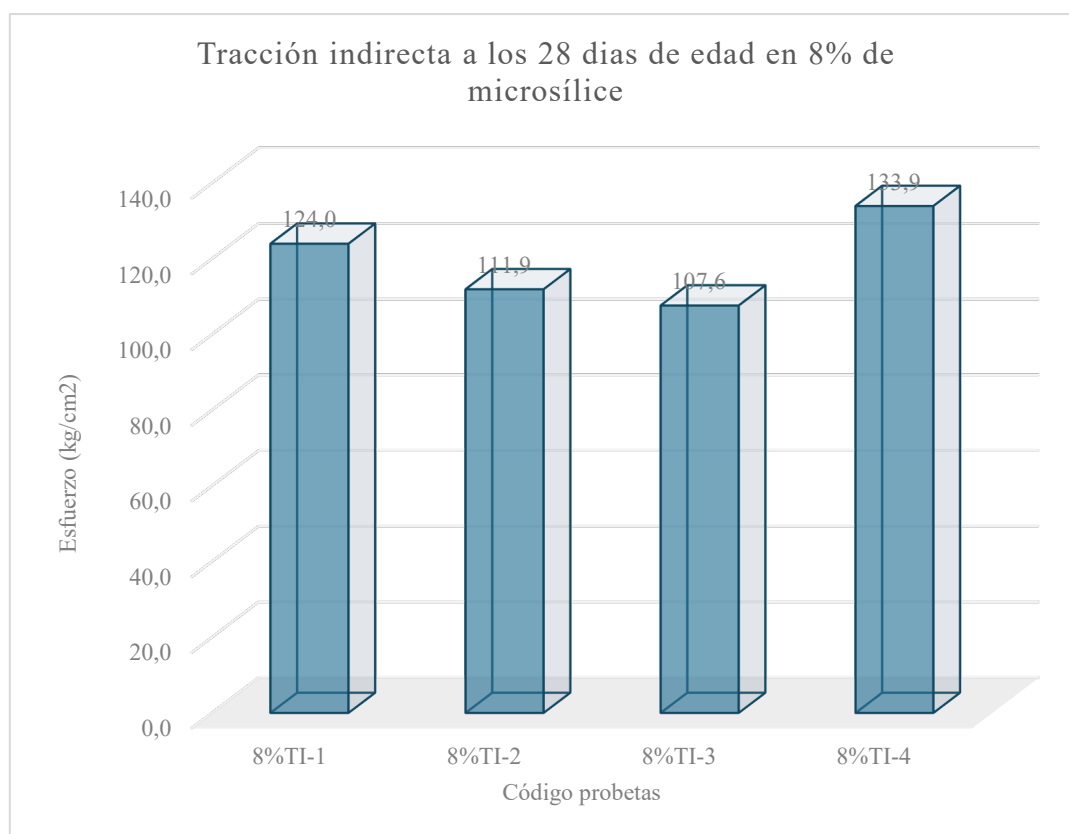


Fig. 180. Valores de tracción indirecta del hormigón con el 8% de microsilíce.

- **Probetas con 12% de microsilíce a los 28 días de edad.**

TABLA L
RESISTENCIA DEL HORMIGÓN CON MICROSÍLICE AL 12%.

Resistencia a la tracción indirecta a los 28 días de edad 12% de microsilíce							
Código Probetas	Área (Cm ²)	Max fuerza (KN)	Max fuerza Axial (MPa)	Resistencia a compresión indirecta (kg/cm ²)	Resistencia a compresión indirecta (kg/cm ²) promedio	Resistencia a compresión Promedio(kg/cm ²)	Relación con la resistencia a compresión (%)
12%TI-1	78,54	76,43	9,73	99,26	108,46	406	26,71
12%TI-2	78,54	84,24	10,73	109,40			
12%TI-3	78,54	82,16	10,46	106,70			
12%TI-4	78,54	91,24	11,62	118,49			

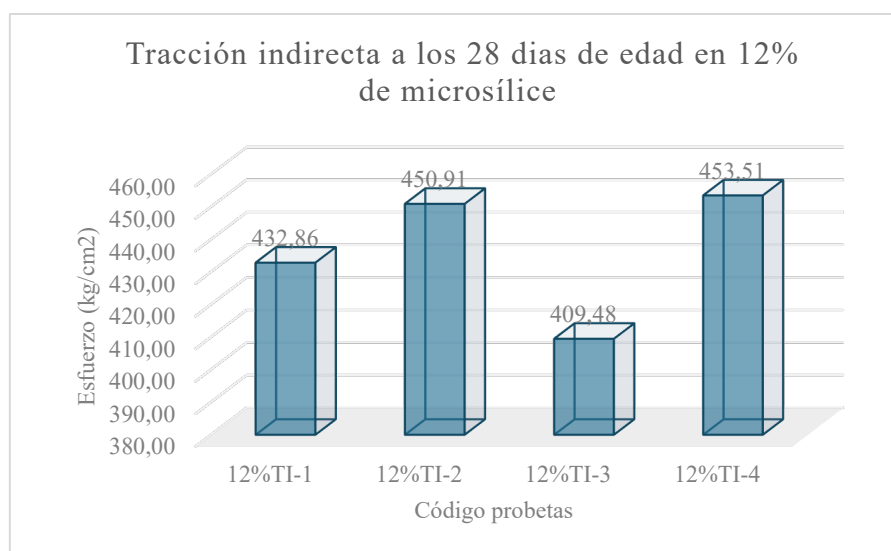


Fig. 21. Valores de tracción indirecta del hormigón con el 12% de microsilíce.

En la Fig. 22, se identifica que la dosificación con mejor resultado y comportamiento frente a la aplicación de cargas a tracción indirecta es la que tiene un remplazo de microsilíce al cemento en 3% donde tiene un valor de resistencia de 160 kg/cm² la cual representa el 28.15% de la resistencia a compresión convencional de la misma.

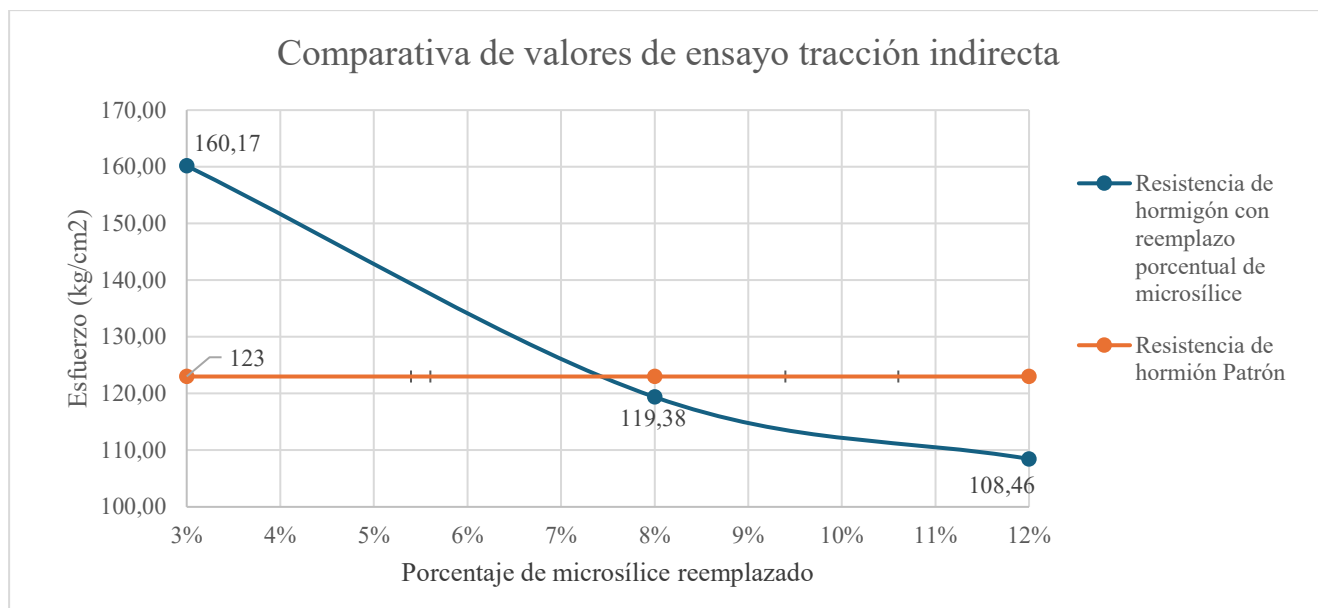


Fig. 22. Valores comparativos de las diferentes dosificaciones.

Módulo de elasticidad.

- **Cálculo teórico.**

El módulo elástico teórico se calculó utilizando las expresiones matemáticas que consideran la composición y la estructura del hormigón. En el caso del hormigón de alta resistencia, el módulo elástico es especialmente importante debido a su impacto en el comportamiento estructural y la durabilidad del material. En este estudio, y basándose en lo propuesto por [33], se ha evaluado la aplicabilidad de una ecuación alternativa para la estimación del módulo elástico en hormigones de alta resistencia. Dicha ecuación incorpora dos relaciones clave: la relación agua/material cementante y la relación microsilice/cemento, factores que han demostrado tener un impacto significativo en las propiedades mecánicas del hormigón. Para validar su precisión, se han comparado los valores obtenidos con los valores establecidos por el American Concrete Institute (ACI).

$$E_c = \frac{26.8t^{0.053}(1+\frac{SF}{C})^{0.28}}{(\frac{a}{C})^{0.18}} \quad (19)$$

Donde:

E_c = Módulo elástico del hormigón.

t = Tiempo.

SF/C = Relación de microsílíce y cemento.

a/c = Relación agua/cemento.

TABLA LI
CÁLCULO TEÓRICO DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD.

CALCULO TEORICO DEL MODULO DE ELASTICIDAD.									
Resistencia a compresión promedio		Patrón			45	MPa	Módulo de elasticidad		
		3%			57	MPa			
		8%			43	MPa	Promedio		
		12%			41	MPa			
Dosificación	Nº Probeta	Datos probetas			ME (MPa) ACI-318	ME (MPa) ACI-363	ME (MPa) Según[33]	ME (MPa) ACI-318	ME (MPa) ACI-363
		Diámetro (mm)	Altura (mm)	Peso (kg)					
Patrón	1	10.1	20	3.658	31572.20	29202.06	37710,59	31572.20	29202.06
	2	10	20	3.712	31572.20	29202.06			
	3	10	20	3.688	31572.20	29202.06			
3%	1	10.2	20	3.694	35450.24	31941.45	38998,51	35450.24	31941.45
	2	10.1	20	3.655	35450.24	31941.45			
	3	10	20	3.664	35450.24	31941.45			
8%	1	10	20	3.561	30706.18	28590.32	40657,27	30706.18	28590.32
	2	10.1	20	3.482	30706.18	28590.32			
	3	10.3	20	3.682	30706.18	28590.32			
12%	1	10	20	3.682	29949.43	28055.77	41715,11	29949.43	28055.77
	2	10.3	20	3.659	29949.43	28055.77			
	3	10.2	20	3.652	29949.43	28055.77			

El análisis de los resultados obtenidos en el cálculo del módulo de elasticidad evidencia que la dosificación con un 3% de microsílíce presentó un incremento significativo en comparación con las demás mezclas evaluadas, el cálculo del ACI 318, se utiliza para hormigones de uso general y disminuye su precisión en hormigones de mayor resistencia, por ende basándonos únicamente al cálculo de la ecuación del ACI 363 el cual está diseñado para hormigones de alto desempeño y más preciso en estos casos.

El cálculo del módulo elástico según [33], demostró una tendencia creciente a medida que aumenta el porcentaje de microsilíce la cual no concuerda con esta investigación. En particular, la dosificación de 3% superó tanto al hormigón base como a las dosificaciones con 8% y 12% de microsilíce, lo que sugiere que una adición moderada de microsilíce mejora la compacidad de la matriz cementante y optimiza la distribución de los productos de hidratación, resultando en una mayor rigidez del material. Por otro lado, se observa que las dosificaciones con 8% y 12% de microsilíce no lograron mantener la tendencia de incremento del módulo de elasticidad, posiblemente debido a un exceso de material puzolánico que podría haber generado una mayor demanda de agua o afectado la continuidad de la fase cementante, reduciendo la eficiencia del material en términos de rigidez.

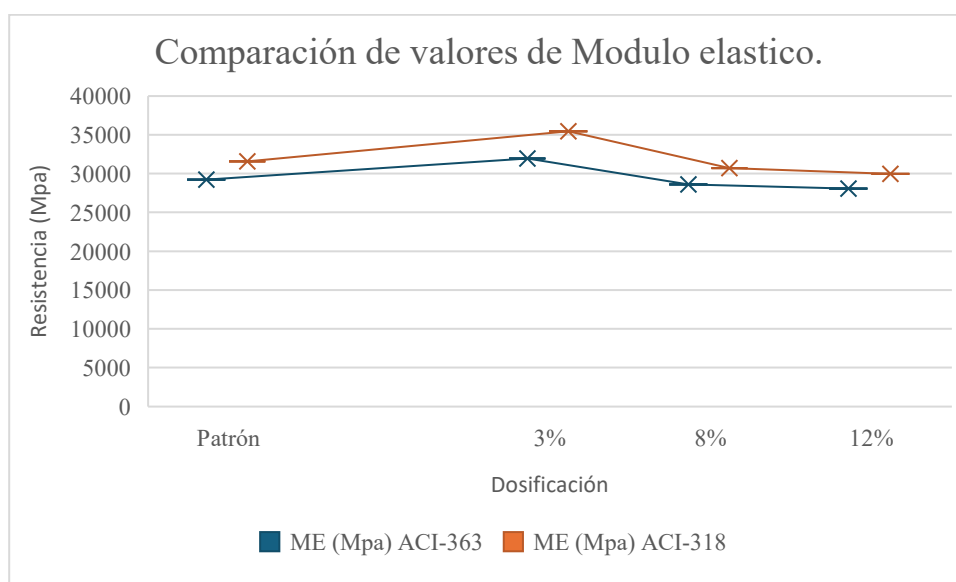


Fig. 193. Valores comparativos de las diferentes dosificaciones.

Al comparar los valores obtenidos del módulo elástico teórico entre el hormigón patrón y la dosificación con un 3 % de microsilíce, se observaron incrementos significativos en los tres métodos utilizados para el cálculo. Según el método teórico basado en la referencia [33], el incremento fue del 3.41 % respecto al hormigón patrón. Por otro lado, el método propuesto por la norma ACI 318 evidenció un incremento del 12.28 %, mientras que el método ACI 363, recomendado específicamente para hormigones de alta resistencia, presentó una diferencia del 9.33 %. Estos resultados reflejan un aumento consistente en la rigidez del hormigón con la adición del 3 % de microsilíce, independientemente del método de cálculo empleado.

Estos resultados confirman que existe una cantidad óptima de microsilíce para mejorar las propiedades mecánicas del hormigón sin comprometer su desempeño estructural.

II. VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS.

Hipótesis:

Las probetas con microsílice alcanzan una resistencia a compresión mayor que la del hormigón patrón sin microsílice.

Verificación de hipótesis.

Para la validación de la hipótesis, se llevó a cabo un análisis de varianza (prueba ANOVA), empleando un método estadístico destinado a evaluar el comportamiento de las propiedades mecánicas con relevancia de los resultados experimentales. Este análisis abarcó la comparación de la resistencia a la compresión, tracción indirecta y módulo elástico según el tipo el porcentaje de microsílice empleado en la dosificación de las mezclas. Se examinó la resistencia a la compresión, tracción indirecta.

El procesamiento y análisis de los datos se llevó a cabo empleando el software RStudio, conforme a la codificación detallada en los Anexos 50 y 51. Además, se formularon dos hipótesis para cada caso, correspondientes a la comparación de la resistencia a la compresión y tracción indirecta: una hipótesis nula (H_0) y una hipótesis alterna (H_1).

Se definió una regla de decisión basada en el valor asociado al estadístico F ($\Pr(>F)$), descrita de la siguiente manera:

- Si $p < 0.05$, se rechaza la hipótesis nula (H_0): No hay diferencia significativa en los valores de resistencia a la compresión entre el hormigón patrón y los especímenes con el 3%, 8% y 12% de microsílice.
- Si $p > 0.05$, no hay evidencia suficiente para rechazar H_0 .

1. ANOVA para la resistencia a la compresión

A partir de los resultados expuestos en la TABLA LIII, se elaboró un gráfico de caja bigote evidenciando los valores promedio de la resistencia a la compresión según el tipo el porcentaje de microsílice empleado en la dosificación de las mezclas, como se observa en la Fig. 24.

En adición, se establecieron las siguientes hipótesis para el análisis:

- **Hipótesis Nula (H_0):** No hay diferencia significativa en los valores de resistencia a la compresión entre el hormigón patrón y los especímenes con el 3%, 8% y 12% de microsílice.
- **Hipótesis Alternativa (H_1):** Existe diferencia significativa en los valores de resistencia a la compresión entre el hormigón patrón y los especímenes con el 3%, 8% y 12% de microsílice.

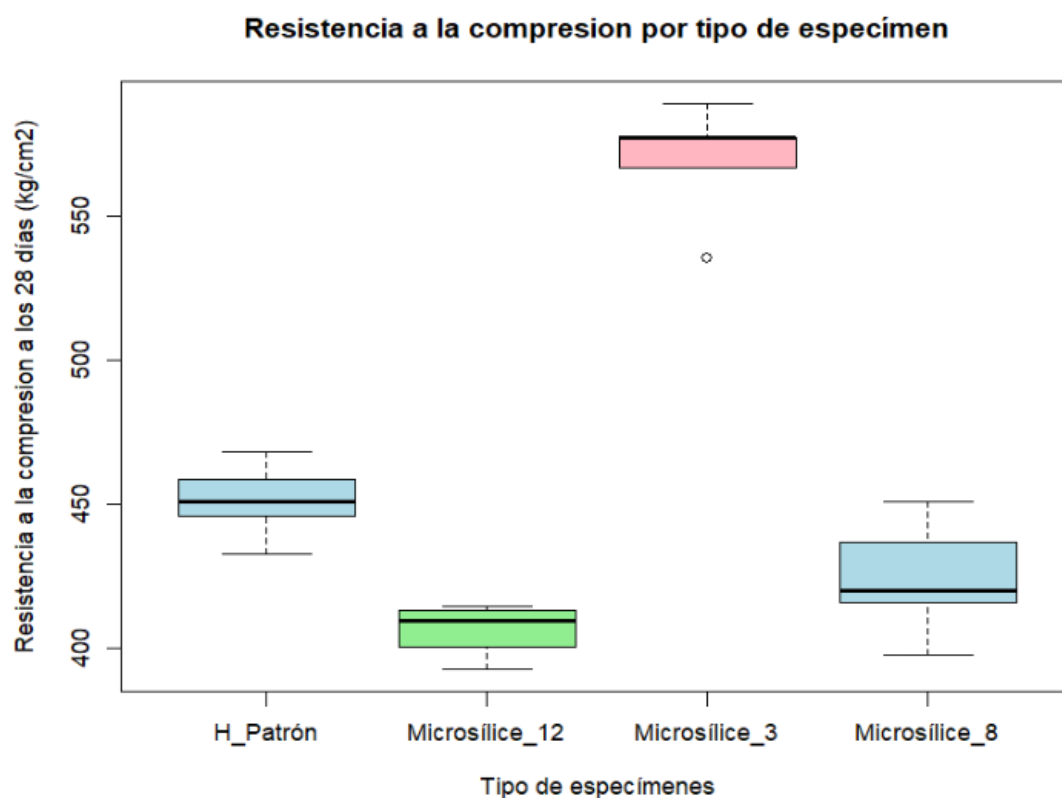


Fig. 204 Caja Bigote para la hipótesis de la resistencia a la compresión.

Así pues, mediante la codificación descrita en el Anexo 50 y aplicada en el software RStudio, se obtuvieron los resultados que se presentan en la TABLA LII.

TABLA LII
RESULTADOS DEL VALOR ASOCIADO AL ESTADÍSTICO F

	Grados de libertad	Sum	Mean	F value	p-value
	Df	sq	Sq		
Especímenes	3	80497	26832	98.56	1.57E-10
Residuales	16	4356	272	NA	NA

Dado que el valor p- value resultó ser 1.57e-10, el cual es inferior a 0.05, aplicando la regla de decisión, con un 95% de confianza se rechaza la hipótesis nula (H_0), lo que indica que existe diferencia estadísticamente significativa en la resistencia a la compresión promedio entre el hormigón patrón y los especímenes con el 3%, 8% y 12% de microsilíce.

En consecuencia, para identificar las diferencias entre los promedios de la resistencia a compresión el hormigón patrón y los especímenes con el 3%, 8% y 12% de microsilíce, se aplicó la prueba de Tukey para comparaciones múltiples. Esta prueba se ejecutó mediante el código: “TukeyHSD (modelo2)”. Generando los resultados presentados en la TABLA LIV.

A partir de esta prueba se formularon las siguientes hipótesis:

H. con microsilíce 12%- H. Patrón.

- **Hipótesis Nula (H_0):** No hay diferencia significativa en la resistencia a la compresión entre hormigón patrón y los especímenes con 12% de microsilíce.
- **Hipótesis Alternativa (H_1):** Existe diferencia significativa en la resistencia a la compresión entre hormigón patrón y los especímenes con 12% de microsilíce.

H. con microsilíce 3%- H. Patrón.

- **Hipótesis Nula (H_0):** No hay diferencia significativa en la resistencia a la compresión entre hormigón patrón y los especímenes con 3% de microsilíce.
- **Hipótesis Alternativa (H_1):** Existe diferencia significativa en la resistencia a la compresión entre hormigón patrón y los especímenes con 3% de microsilíce.

H. con microsilíce 8%- H. Patrón.

- **Hipótesis Nula (H_0):** No hay diferencia significativa en la resistencia a la compresión entre hormigón patrón y los especímenes con 8% de microsilíce.
- **Hipótesis Alternativa (H_1):** Existe diferencia significativa en la resistencia a la compresión entre hormigón patrón y los especímenes con 8% de microsilíce.

H. con microsilíce 3%- H. con microsilíce 12%.

- **Hipótesis Nula (H_0):** No hay diferencia significativa en la resistencia a la compresión entre los especímenes con 3% y los especímenes con 12% de microsilíce.
- **Hipótesis Alternativa (H_1):** Existe diferencia significativa en la resistencia a la compresión entre los especímenes con 3% y los especímenes con 12% de microsilíce.

H. con microsilíce 8%- H. con microsilíce 12%.

- **Hipótesis Nula (H_0):** No hay diferencia significativa en la resistencia a la compresión entre los especímenes con 8% y los especímenes con 12% de microsilíce.
- **Hipótesis Alternativa (H_1):** Existe diferencia significativa en la resistencia a la compresión entre los especímenes con 8% y los especímenes con 12% de microsilíce.

H. con microsilíce 8%- H. con microsilíce 3%.

- **Hipótesis Nula (H_0):** No hay diferencia significativa en la resistencia a la compresión entre los especímenes con 8% y los especímenes con 3% de microsilíce.
- **Hipótesis Alternativa (H_1):** Existe diferencia significativa en la resistencia a la compresión entre los especímenes con 8% y los especímenes con 3% de microsilíce.

TABLA LIII
RESULTADOS DE LA PRUEBA TUKEY PARA LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN ENTRE
HORMIGÓN PATRÓN Y LOS ESPECÍMENES CON EL 3%, 8% Y 12% DE MICROSÍLICE.

Comparación	Diferencia	Límite inferior	Límite superior	P- valor ajustado
	(diff)	(lwr)	(upr)	(p adj)
H. con microsilíce 12%- H. Patrón	-45.192	-75.04723	-15.336767	0.0026144
H. con microsilíce 3%- H. Patrón	117.660	87.80477	147.515233	0.0000000
H. con microsilíce 8%- H. Patrón	-27.014	-56.86923	2.841233	0.0834091
H. con microsilíce 3%- H. con microsilíce 12%	162.852	132.99677	192.707233	0.0000000
H. con microsilíce 8%- H. con microsilíce 12%	18.178	-11.67723	48.033233	0.3356320
H. con microsilíce 8%- H. con microsilíce 3%	-144.674	-174.52923	-114.818767	0.0000000

Para evaluar la significancia estadística de las diferencias en resistencia a la compresión, se aplicó la regla de decisión previamente establecida. En la comparación entre los especímenes de hormigón con microsilíce al 12% y el hormigón patrón, se obtuvo un valor P de 0.0026144, inferior a 0.05, lo que llevó al rechazo de la hipótesis nula, evidenciando una diferencia significativa. De manera similar, al comparar el hormigón con microsilíce al 3% con el hormigón patrón, el valor P de 0.0000000 confirmó una diferencia estadísticamente significativa.

Por otro lado, al analizar la comparación entre el hormigón con microsilíce al 8% y el hormigón patrón, el valor P fue 0.834091, superando el umbral de 0.05, lo que indica que no se encontró evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula. De igual forma, la comparación entre hormigón con microsilíce al 3% y al 12% arrojó un valor P de 0.0000000, lo que sugiere diferencias significativas en resistencia. Sin embargo, en la evaluación entre hormigón con microsilíce al 8% y al 12%, el valor P de 0.335632 no permitió rechazar la hipótesis nula, indicando ausencia de diferencias relevantes. Finalmente, la comparación entre hormigón con microsilíce al 8% y al 3% presentó un valor P de 0.000000, lo que reafirma una diferencia significativa en resistencia a la compresión.

1. ANOVA para la resistencia a la tracción indirecta

A partir de los resultados expuestos en la TABLA LV, se elaboró un gráfico de caja bigote evidenciando los valores promedios de la resistencia a la tracción indirecta según el tipo el porcentaje de microsilíce empleado en la dosificación de las mezclas, como se observa en la Fig. 25.

En adición, se establecieron las siguientes hipótesis para el análisis:

- **Hipótesis Nula (H_0):** No hay diferencia significativa en los valores de resistencia a la tracción indirecta entre el hormigón patrón y los especímenes con el 3%, 8% y 12% de microsilíce.
- **Hipótesis Alternativa (H_1):** Existe diferencia significativa en los valores de resistencia a la tracción indirecta entre el hormigón patrón y los especímenes con el 3%, 8% y 12% de microsilíce.

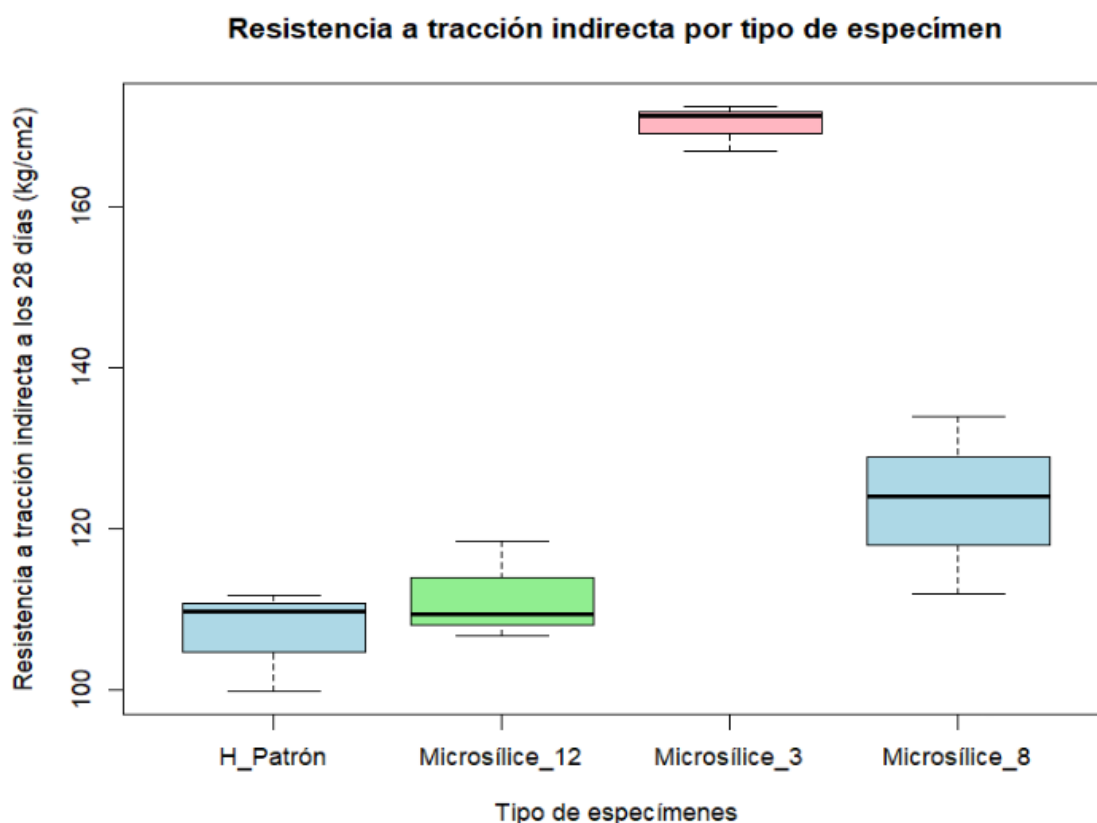


Fig. 215 Caja Bigote para la hipótesis de la resistencia a la tracción indirecta.

Así pues, mediante la codificación descrita en el Anexo 51 y aplicada en el software

RStudio, se obtuvieron los resultados que se presentan en la TABLA LIV.

TABLA LIV
RESULTADOS DEL VALOR ASOCIADO AL ESTADÍSTICO F

	Grados de libertad	Sum	Mean	F value	p-value
	Df	sq	Sq		
Especímenes	3	7498	2499.2	47.9	1.86E-05
Residuales	8	417	52.2	NA	NA

Dado que el p- value resultó ser 1.86e-5, el cual es inferior a 0.05, aplicando regla de decisión, con un 95% se rechaza la hipótesis nula (H_0), lo que indica que existe diferencia estadísticamente significativa en la resistencia a la tracción indirecta promedio entre el hormigón patrón y los especímenes con el 3%, 8% y 12% de microsilíce.

En consecuencia, para identificar las diferencias entre promedio entre el hormigón patrón y los especímenes con el 3%, 8% y 12% de microsilíce, se aplicó la prueba de Tukey para comparaciones múltiples. Esta prueba se ejecutó mediante el código: “TukeyHSD (modelo2)”. Generando los resultados presentados en la TABLA LVI.

A partir de esta prueba se formularon las siguientes hipótesis:

H. con microsilíce 12%- H. Patrón.

- **Hipótesis Nula (H_0):** No hay diferencia significativa en la resistencia a la tracción indirecta entre hormigón patrón y los especímenes con 12% de microsilíce.
- **Hipótesis Alternativa (H_1):** Existe diferencia significativa en la resistencia a la compresión entre hormigón patrón y los especímenes con 12% de microsilíce.

H. con microsilíce 3%- H. Patrón.

- **Hipótesis Nula (H_0):** No hay diferencia significativa en la resistencia a la tracción indirecta entre hormigón patrón y los especímenes con 3% de microsilíce.
- **Hipótesis Alternativa (H_1):** Existe diferencia significativa en la resistencia a la tracción indirecta entre hormigón patrón y los especímenes con 3% de microsilíce.

H. con microsilíce 8%- H. Patrón.

- **Hipótesis Nula (H_0):** No hay diferencia significativa en la resistencia a la tracción indirecta entre hormigón patrón y los especímenes con 8% de microsilíce.
- **Hipótesis Alternativa (H_1):** Existe diferencia significativa en la resistencia a la tracción indirecta entre hormigón patrón y los especímenes con 8% de microsilíce.

H. con microsilíce 3%- H. con microsilíce 12%.

- **Hipótesis Nula (H_0):** No hay diferencia significativa en la resistencia a la tracción indirecta entre los especímenes con 3% y los especímenes con 12% de microsilíce.
- **Hipótesis Alternativa (H_1):** Existe diferencia significativa en la resistencia a la tracción indirecta entre los especímenes con 3% y los especímenes con 12% de microsilíce.

H. con microsilíce 8%- H. con microsilíce 12%.

- **Hipótesis Nula (H_0):** No hay diferencia significativa en la resistencia a la tracción indirecta entre los especímenes con 8% y los especímenes con 12% de microsilíce.
- **Hipótesis Alternativa (H_1):** Existe diferencia significativa en la resistencia a la tracción indirecta entre los especímenes con 8% y los especímenes con 12% de microsilíce.

H. con microsilíce 8%- H. con microsilíce 3%.

- **Hipótesis Nula (H_0):** No hay diferencia significativa en la resistencia a la tracción indirecta entre los especímenes con 8% y los especímenes con 3% de microsilíce.
- **Hipótesis Alternativa (H_1):** Existe diferencia significativa en la resistencia a la tracción indirecta entre los especímenes con 8% y los especímenes con 3% de microsilíce.

TABLA LV
RESULTADOS DE LA PRUEBA TUKEY PARA LA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN INDIRECTA ENTRE
HORMIGÓN PATRÓN Y LOS ESPECÍMENES CON EL 3%, 8% Y 12% DE MICROSÍLICE.

Comparación	Diferencia	Límite inferior	Límite superior	P- valor ajustado
	(diff)	(lwr)	(upr)	(p adj)
H. con microsilice 12%- H. Patrón	4.386667	-14.499939	23.27327	0.8768151
H. con microsilice 3%- H. Patrón	62.936667	44.050061	81.82327	0.0000244
H. con microsilice 8%- H. Patrón	16.143333	-2.743272	35.02994	0.096397
H. con microsilice 3%- H. con microsilice 12%	58.55	39.663395	77.43661	0.0000417
H. con microsilice 8%- H. con microsilice 12%	11.756667	-7.129939	30.64327	0.2663058
H. con microsilice 8%- H. con microsilice 3%	- 46.793333	-65.679939	-27.90673	0.0002134

Se aplicó la misma regla de decisión previamente descrita, obteniendo los siguientes resultados; En la comparación entre el hormigón con microsilice al 12% y el hormigón patrón, el valor P de 0.8768151 superó el umbral de 0.05, lo que indica que no hay diferencias significativas. Un resultado similar se obtuvo en la comparación entre el hormigón con microsilice al 8% y el hormigón patrón, donde el valor P de 0.0963970 tampoco permitió rechazar la hipótesis nula. Además, al comparar el hormigón con microsilice al 8% y al 12%, el valor P de 0.2663058 confirmó la ausencia de diferencias relevantes.

Por otro lado, se encontraron diferencias significativas en otras comparaciones. El hormigón con microsilice al 3% mostró una resistencia significativamente mayor en comparación con el hormigón patrón, con un valor P de 0.0000244. Asimismo, al contrastar el hormigón con microsilice al 3% con el de 12%, se obtuvo un valor P de 0.0000417, indicando una variación significativa en resistencia. Finalmente, la comparación entre el hormigón con microsilice al 8% y al 3% arrojó un valor P de 0.0002134, lo que confirma una diferencia estadísticamente significativa en resistencia a la tracción indirecta.

CAPITULO IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIÓN.

I. CONCLUSIONES.

- Los ensayos realizados a los agregados finos y gruesos cumplieron con las especificaciones de las normas INEN y ASTM en cuanto a granulometría, densidad y absorción. Esto garantiza su idoneidad para la producción de hormigón de alta resistencia, lo cual se reflejó en la obtención de un hormigón base con resistencia a la compresión de 451.25 kg/cm^2 , validando la importancia de una correcta selección de materiales para cumplir los requisitos estructurales.
- La dosificación fue diseñada conforme al método ACI para alcanzar una resistencia objetivo de 450 kg/cm^2 . El empleo de microsilíce como reemplazo parcial del cemento en porcentajes de 3%, 8% y 12% permitió evaluar su efecto sobre el comportamiento mecánico del hormigón. Se utilizó aditivo superplastificante para asegurar trabajabilidad y homogeneidad, optimizando la relación agua/cemento y favoreciendo el desarrollo de resistencias superiores.
- Resistencia a compresión: La inclusión del 3% de microsilíce incrementó la resistencia en un 26.04%, alcanzando 568.91 kg/cm^2 respecto al hormigón base (451.25 kg/cm^2). En contraste, las dosificaciones del 8% y 12% redujeron la resistencia a 426.83 kg/cm^2 y 406.05 kg/cm^2 , representando una disminución del 5.41% y 10.01%, respectivamente.
- Tracción indirecta: No se evidenció mejora con la adición de microsilíce. El hormigón base y el 3% presentaron la misma resistencia (160.17 kg/cm^2), mientras que las dosificaciones de 8% y 12% disminuyeron a 119.38 kg/cm^2 y 108.46 kg/cm^2 , lo que representa una reducción del 25.5% y 32.3% con respecto al patrón.
- Módulo elástico: La mezcla con 3% de microsilíce alcanzó el valor más alto (35450.24 MPa), superando en un 12.27% al hormigón base (31572.2 MPa). Las mezclas con 8% y 12% mostraron una disminución de 2.75% y 5.13%, respectivamente. Esto indica que la dosificación óptima para mejorar la rigidez del hormigón fue del 3%.
- Los resultados mostraron que la mezcla con un 3 % de microsilíce presentó el mejor desempeño mecánico, alcanzando una resistencia promedio a la compresión de $568,91 \text{ kg/cm}^2$, una resistencia a tracción indirecta de 160 kg/cm^2 ,

y un módulo de elasticidad teórico de 48.608,8 MPa, en comparación con el hormigón patrón. En contraste, las mezclas con 8 % y 12 % mostraron un rendimiento inferior, evidenciando que un exceso de microsílice no mejora necesariamente las propiedades del material

- El análisis estadístico confirmó que la dosificación con 3% de microsílice mejora significativamente la resistencia a compresión y el módulo elástico, sin afectar negativamente la tracción indirecta. Además, representa una opción técnica y económicamente eficiente, ya que incrementa el rendimiento del hormigón sin elevar considerablemente los costos. Por tanto, no es necesario emplear mayores porcentajes de microsílice para obtener un hormigón de alto desempeño con materiales locales.
- El análisis de varianza confirmó diferencias significativas entre los grupos, especialmente en los parámetros de compresión y módulo elástico, favoreciendo la mezcla con 3% de microsílice. Desde una perspectiva económica, esta dosificación representa una opción eficiente, ya que mejora las propiedades mecánicas sin incrementar notablemente los costos de producción. El uso de materiales locales y la baja cantidad de adición necesaria refuerzan su viabilidad técnica y financiera en aplicaciones estructurales.

II. RECOMENDACIONES.

- Se recomienda esperar un mínimo de 30 minutos después de retirar el cilindro de la cámara de curado antes de realizar la prueba de compresión. Esta medida es fundamental para evitar que la humedad superficial influya en los resultados, asegurando una evaluación más precisa de la resistencia final de las probetas.
- Es fundamental seguir estrictas medidas de seguridad al manipular microsílice, ya que al ser un polvo con partículas más finas que el cemento, puede ser inhalado fácilmente, lo que representa un riesgo para la salud. Se recomienda el uso de equipos de protección personal (EPP) adecuados, como mascarillas con filtros específicos, guantes y gafas de seguridad, para evitar la exposición a las partículas. Además, se debe trabajar en áreas bien ventiladas o utilizar sistemas de extracción de polvo para minimizar la concentración de partículas en el aire. Estas precauciones son esenciales para proteger la salud de los trabajadores y garantizar un entorno de trabajo seguro.
- Para la elaboración de hormigones de alta resistencia, es crucial utilizar únicamente maquinarias adecuadas, como concretas y mixers, que aseguren la homogeneidad de la mezcla. La uniformidad en la dosificación y mezcla es esencial para alcanzar las propiedades mecánicas requeridas. Además, se recomienda realizar el vaciado del hormigón en lugares donde haya protección contra la exposición directa al sol. El calor excesivo durante el proceso de fundición puede elevar la temperatura del hormigón, lo que podría afectar negativamente sus características y, en algunos casos, generar un rechazo del material. Por lo tanto, es fundamental controlar tanto la mezcla como las condiciones ambientales para asegurar la calidad del producto final.
- Se recomienda realizar un ensayo previo del uso de microsílice y el porcentaje óptimo de acuerdo con los materiales locales, sin embargo, se ha observado que las cantidades utilizadas frecuentemente suelen ser menores o igual al 15%.
- Es recomendable la elaboración de un número suficiente de probetas de hormigón para cada dosificación estudiada, como en el presente estudio, donde se confeccionaron 40 probetas divididas en cuatro grupos de 10 unidades con porcentajes de microsílice de 0%, 3%, 8% y 12%. Adicionalmente, es aconsejable preparar probetas extra destinadas al control de posibles errores humanos o instrumentales y a la verificación de la precisión en las mezclas.

BIBLIOGRAFÍA:

- [1] INEN 696, “Ensayo de Materiales (Universidad Central del Ecuador),” Quito, 2011.
- [2] ACI Commite 211, “ACI-211-4r-93,” vol. 4r-93, 1998.
- [3] I. Geofísico, “Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional,” EPN. [Online]. Available: <https://www.igepn.edu.ec/cayambe/805-terremoto-del-5-de-agosto-de-1949>
- [4] M. Inés, “Utilización de los concretos de alta resistencia y concretos celulares en la industria de la construcción ecuatoriana, clasificados por sectores: vivienda, electricidad, gas/petróleo, salud y educación,” Quito, Mar. 2018.
- [5] A. 211, “About drawdown drilling parameters design procedure at primary formation exposing by a horizontal wellbore,” *Neftyanoe khozyaystvo - Oil Industry*, no. 9, pp. 120–121, 2006.
- [6] A. M. Carvajal, “El comercio,” *El 45% de las casas informales de Quito tienen mayor riesgo sísmico.*, Quito, p. 1, Aug. 14, 2019.
- [7] M. López and J. T. Castro, “Effect of natural pozzolans on porosity and pore connectivity of concrete with time,” *Revista Ingenieria de Construccin*, vol. 25, no. 3, pp. 419–431, 2010, doi: 10.4067/s0718-50732010000300006.
- [8] D. En and I. Civil, “Diseño óptimo para obtener Concreto de Alta Resistencia para Obras Civiles en Zonas Alto Andinas del Perú,” 2017.
- [9] Md. J.E. Mier Osejo, MD. y C.L. Mier Iñiguez, *Silicosis pulmonar*, vol. 27. 2015, p. 344. doi: <https://doi.org/10.30789/rcneumologia.v27.n4.2015.73>.
- [10] ACI Committee 211, “ACI 211.4R-08: Guide for Selecting Proportions for High-strength Concrete Using Portland Cement and Other Cementitious Materials,” *American Concrete Institute, USA*, pp. 1–25, 2008.
- [11] J. A. Bickley *et al.*, “ACI 363.2R - Guide to Quality Control and Testing of High-

Strength Concrete,” 1998.

- [12] L. A. Ingenieria, “Evaluación de Concretos Reforzados Adicionados con Escoria de Alto Horno , Cenizas Volantes y Microsilica con EIS .,” no. September 2014, 2009.
- [13] L. Allauca, H. Amen, and J. Lung, “Uso de Sílice en hormigones de Alto Desempeño .,” no. 1.
- [14] F. Köksal, F. Altun, I. Yiğit, and Y. Şahin, “Combined effect of silica fume and steel fiber on the mechanical properties of high strength concretes,” *Constr Build Mater*, vol. 22, no. 8, pp. 1874–1880, 2008, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.04.017.
- [15] P. Guía and P. Cea, “Ingeniero Civil Logistico,” p. 129, 2016.
- [16] Ing.Mg.Jorge Emiliano Bedón López and I. Civil, “Diseño óptimo para obtener Concreto de Alta Resistencia para Obras Civiles en Zonas Alto Andinas del Perú,” 2017.
- [17] Robert Paul Buenaño Sanchez, “Universidad central del ecuador facultad de ingeniería, ciencias físicas y matemática carrera de ingeniería civil hormigón de alta resistencia ($f'c = 53$ mpa) utilizando el cemento armado especial de la línea lafarge trabajo de graduación, previo a la obtención del título,” Quito, 2014.
- [18] J. Cajilema and J. Morales, “Insidencia Del Microsilice En El Diseño De Hormigon De Alta Resistencia,” p. 230, 2020.
- [19] ASTM International, “Designación: ASTM C 136-01 Método de Ensayo Normalizado para determinar el Análisis Granulométrico de los Áridos Finos y Gruesos,” 2019.
- [20] Q. -Ecuador, “Instituto ecuatoriano de normalización norma técnica ecuatoriana NTE INEN 856:2010 Primera revisión.”
- [21] Q. -Ecuador and P. Edición, “Instituto ecuatoriano de normalización norma técnica ecuatoriana NTE INEN 857:2010 Primera revisión Áridos.

determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido grueso.”

- [22] Servicio Ecuatoriano de Normalización, “Hormigón. Elaboración y curado de especímenes de ensayo en el laboratorio.” Quito, Mar. 2017.
- [23] American Association State, “ASTM Designación ASTM C 138/C 138M-01a.”
- [24] Instituto Ecuatoriano de Normalización, “NTE INEN 156:2009 Segunda revisión. Cemento hidráulico. Determinación de la densidad.” Quito, Jul. 2009.
- [25] Instituto Ecuatoriano de Normalización, “INEN 2528, Cámaras de curado, gabinetes húmedos, tanques para almacenamiento en agua y cuartos para elaborar mezclas, utilizados en ensayos de cemento hidráulico y hormigón. requisitos.” 2010.
- [26] INEN, “INEN 1573-Determinación de la resistencia del hormigón”.
- [27] Norma Técnica Ecuatoriana, “NTE INEN 1 573: Hormigón de cemento hidráulico. determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico,” 2010.
- [28] F. L. Lobo and B. Carneiro, “TRACCION INDIRECTA.” [Online]. Available: <http://masqueingenieria.com/blog/ensayos-a-traccion-indirecta>.
- [29] ASTM, “Designación: ASTM C 496-96.”
- [30] COGUANOR, “COGUANOR NTG 41017-h16.Método de ensayo. Determinación del módulo de elasticidad estático y la relación de Poisson del concreto a compresión.” [Online]. Available: www.mineco.gob.gt
- [31] American Concrete Institute, “ACI 318S/318SR-05 Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural y Comentario,” *Director*, p. 520, 2008, [Online]. Available: https://www.oaxaca.gob.mx/sinfra/wp-content/uploads/sites/14/2016/02/ACI_318_2005.pdf%0Ahttps://blog.structuralia.com/aci-318

- [32] ASTM, “ASTM C-131 INEN 860:2011 áridos. determinación del valor de la degradación del árido grueso de partículas menores a 37,5 mm mediante el uso de la máquina de los Ángeles.”

- [33] * D Mostofinejad and M. Nozhati, “Prediction of the Modulus of Elasticity of High Strength Concrete,” 2005. [Online]. Available: www.SID.ir

ANEXOS.**ANEXO 1**

Descripción: Recolección de los agregados para la elaboración del hormigón.

ANEXO 2

Descripción: Cuarteo de los agregados para recolección de muestras para ensayos.

ANEXO 3

Descripción: Tamizado del agregado fino.

ANEXO 4

Descripción: Tamizado del agregado grueso.

ANEXO 5

Descripción: Densidad real del agregado fino.

ANEXO 6

Descripción: Densidad real del agregado fino.

ANEXO 7**ANEXO 8**



Descripción: Densidad real del agregado grueso.

ANEXO 9



Descripción: Ensayo de abrasión del agregado grueso.

ANEXO 10



Descripción: Ensayo de abrasión del agregado grueso.

ANEXO 11



Descripción: Muestra seca del agregado grueso.

ANEXO 12



Descripción: Muestra seca del agregado fino.

ANEXO 13



Descripción: Ensayo de compactación del agregado fino.

ANEXO 14



Descripción: Ensayo de compactación del agregado grueso.

ANEXO 15



Descripción: Densidad real del agregado fino.

ANEXO 16



Descripción: Densidad real del cemento.

Descripción: Ensayo densidad real del cemento.

ANEXO 17



Descripción: Elaboración de hormigón base con la utilización de concretera.

ANEXO 18



Descripción: Medición y utilización de aditivo para la realización de hormigón base.

ANEXO 19



Descripción: Medición de temperatura del hormigón base.

ANEXO 20



Descripción: Densidad del hormigón en estado fresco.

ANEXO 21



Descripción: Revisión del asentamiento del hormigón base.

ANEXO 22



Descripción: Elaboración de probetas en moldes certificados.

ANEXO 23



Descripción: Desencofrado de y codificado de probetas.

ANEXO 24



Descripción: Curado de probetas.

ANEXO 25



Descripción: Ensayo de compresión de hormigón base.

ANEXO 26



Descripción: Revisión de tipo de rotura del hormigón base.

ANEXO 27



Descripción: Ensayo de tracción indirecta de hormigón base.

ANEXO 28



Descripción: Medición y utilización de aditivo para la realización de hormigón base.

ANEXO 29



Descripción: Ensayo de módulo elástico de hormigón base.

ANEXO 30



Descripción: Obtención de microsílíce.

ANEXO 31

ANEXO 32



Descripción: Elaboración de hormigón con porcentaje parcial de microsilíce.

ANEXO 33



Descripción: Desencofrado de hormigón con porcentaje parcial de microsilíce.

ANEXO 34



Descripción: Curado de probetas con porcentaje parcial de microsilíce.

ANEXO 35



Descripción: Codificación y clasificación de probetas de hormigón con microsilíce previo ensayos.

ANEXO 36



Descripción: Ensayo de compresión de hormigón con 3% de microsilíce.

ANEXO 37



Descripción: Revisión de rotura de hormigón con 3% de microsilíce en ensayo de compresión.

ANEXO 38



Descripción: Ensayo de compresión de hormigón con 8% de microsilíce.

ANEXO 39



Descripción: Revisión de rotura de hormigón con 8% de microsilíce en ensayo de compresión.

ANEXO 40



Descripción: Ensayo de compresión de hormigón con 12% de microsilíce.

ANEXO 41



Descripción: Revisión de rotura de hormigón con 8% de microsilíce en ensayo de compresión.

ANEXO 42



Descripción: Ensayo de Tracción indirecta de hormigón con 3% de microsilíce.

ANEXO 43



Descripción: Revisión de rotura de hormigón con 3% de microsilíce en ensayo de tracción indirecta.

ANEXO 44



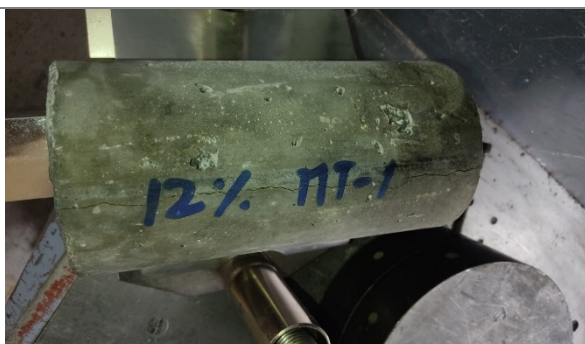
Descripción: Ensayo de tracción indirecta de hormigón con 8% de microsilíce.

ANEXO 45



Descripción: Revisión de rotura de hormigón con 8% de microsilíce en ensayo de tracción indirecta.

ANEXO 46



Descripción: Ensayo de tracción indirecta de hormigón con 12% de microsilíce.

ANEXO 47



Descripción: Revisión de rotura de hormigón con 8% de microsilíce en ensayo de tracción indirecta.

ANEXO 48

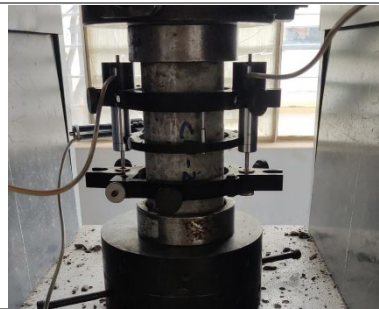


Descripción: Ensayo de Módulo elástico de hormigón con 3% de microsilíce.



Descripción: Ensayo de Módulo elástico de hormigón con 8% de microsilíce.

ANEXO 49



Descripción: Ensayo de Módulo elástico de hormigón con 12% de microsilíce.

ANEXO 50

PRUEBA DE HIPÓTESIS PARA LA COMPRESIÓN

1. Ingreso de datos de la resistencia a compresión

```
especímenes <- rep(c("H_Patrón", "Microsilíce_3", "Microsilíce_8", "Microsilíce_12"), each
= 3) # Tratamientos
```

```
resistencia_compresión <- c(450.91, 445.84, 458.7, 467.92, # Rendimientos resistencia a
compresión del H_patrón
```

```
577.01, 566.49, 576.88, 588.7, # Rendimientos resistencia a compresión del Microsilíce_3
```

```
415.97, 436.62, 419.74, 451.04, # Rendimientos resistencia a compresión del Microsilíce_8
```

```
414.55, 409.48, 413.25, 400.39) # Rendimientos resistencia a compresión del
Microsilíce_12
```

```
# Crear un data frame
```

```
datos <- data.frame(Especímenes = especímenes, Resistencia_compresión =
resistencia_compresión)
```

```
head(datos)
```

```
## 2. Visualización preliminar ##
```

```
# Boxplot para observar la distribución por tratamiento
```

```
boxplot(Resistencia_compresión ~ Especímenes, data = datos,
```

```
main = "Resistencia a compresión por tipo de espécimen",
```

```
xlab = "Tipo de especímenes", ylab = "Resistencia a compresión a los 28 días (kg/cm2)",
```

```
col = c("lightblue", "lightgreen", "lightpink"))
```

```
## 3. Análisis de varianzas (ANOVA) ##
```

```
# Modelo ANOVA
```

```
modelo_compresión <- aov(Resistencia_compresión ~ Especímenes, data = datos)
```

```
# Resumen del ANOVA
```

```
summary(modelo_compresión)
```

```
# Prueba de Tukey para comparaciones múltiples
```

```
TukeyHSD(modelo_compresión)
```

Descripción: Codificación descrita y aplicada en el software RStudio para compresión.

ANEXO 51

```
##### PRUEBA DE HIPÓTESIS PARA TRACCIÓN INDIRECTA #####
```

```
## 1. Ingreso de datos de la resistencia a tracción indirecta ##
```

```
especímenes <- rep(c("H_Patrón", "Microsílice_3", "Microsílice_8", "Microsílice_12"), each  
= 3) # Tratamientos
```

```
resistencia_traccion_indirecta <- c(109.74, 99.87, 111.82, # Rendimientos resistencia a  
tracción indirecta del H_patrón
```

```
171.16, 172.27, 166.81, # Rendimientos resistencia a tracción indirecta del Microsílice_3
```

```
123.97, 111.94, 133.95, # Rendimientos resistencia a tracción indirecta del Microsílice_8
```

```
109.4, 106.7, 118.49) # Rendimientos resistencia a tracción indirecta del Microsílice_12

# Crear un data frame

datos <- data.frame(Especímenes = especímenes, Resistencia_traccion_indirecta =
resistencia_traccion_indirecta)

head(datos)


## 2. Visualización preliminar ##

# Boxplot para observar la distribución por tratamiento

boxplot(Resistencia_traccion_indirecta ~ Especímenes, data = datos,

main = "Resistencia a tracción indirecta por tipo de espécimen",

xlab = "Tipo de especímenes", ylab = "Resistencia a tracción indirecta a los 28 días (kg/cm2)",

col = c("lightblue", "lightgreen", "lightpink"))


## 3. Análisis de varianzas (ANOVA) ##

# Modelo ANOVA

modelo_traccion <- aov(Resistencia_traccion_indirecta ~ Especímenes, data = datos)

# Resumen del ANOVA

summary(modelo_traccion)

# Prueba de Tukey para comparaciones múltiples

TukeyHSD(modelo_traccion)
```

Descripción: Codificación descrita y aplicada en el software RStudio para tracción indirecta.
