

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES

1.1 Antecedentes

El hormigón es uno de los materiales que ampliamente es utilizado para la construcción civil debido a su alta resistencia a la compresión, que una de las debilidades que presenta es frente a la tracción, lo cual genera un comportamiento débil ante ciertos tipos de esfuerzos, especialmente en sus primeras edades. Esta condición se manifiesta con mayor intensidad en elementos estructurales como las losas, donde la pérdida rápida de la humedad superficial originada por factores ambientales como alta temperatura, viento y baja humedad relativa que produce fisuración por retracción plástica antes de que el material adquiriera la resistencia suficiente.

Estas fisuras tempranas no solo afectan la apariencia superficial del elemento estructural, ya que permiten el ingreso de agentes agresivos (como cloruros o sulfatos) que aceleran la corrosión del acero, reduciendo la vida útil de la estructura. Frente a esta problemática, diversos estudios han propuesto la incorporación de fibras al hormigón como una solución alternativa para mejorar su cohesión interna y limitar la propagación de las fisuras superficiales. Entre las alternativas se encuentra la fibra de vidrio, un material sintético que ha demostrado ser eficaz como refuerzo para controlar la fisuración en estado plástico, esta fibra presenta ventajas como a resistencia a la tracción, y buena dispersión en la mezcla.

Por otro lado, las fibras de vidrio AR se emplean principalmente para disminuir la fisuración causada por la retracción plástica del hormigón, especialmente en elementos donde se requiere un acabado de alta calidad sin la presencia visible de fibras tradicionales. Según la ficha técnica de la dosificación recomendada es de 0,4 a 1,0 kg/m³ de hormigón (en peso),

Esta cantidad permite mejorar la resistencia a la retracción plástica y reducir la fisuración sin afectar la trabajabilidad de la mezcla (Fibratec, 2024).

En cuanto a la resistencia a la tracción del concreto, aparece una disminución de su valor cuando se incorporan fibras de vidrio a la mezcla, por lo que la máxima resistencia a la tracción se consigue añadiendo un 0,025% de fibra de vidrio, donde se

puede conseguir una máxima resistencia a la tracción (2,30), al incorporar un 0,125% de fibras de vidrio, una Resistencia a la tracción máxima (1,06), estos son valores de 28 días de ensayo. Concluimos que cuanto más fibra de vidrio se agrega, menor es la resistencia a la tracción (Bernaola, 2021).

El hormigón $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ con fibra de vidrio tipo AR en proporciones de 1,0%, 1,5% y 2,0%. Los ensayos arrojaron que con 1.00% alcanzando una solidez promedio de 206 kg/cm^2 en el ensayo de compresión. En el ensayo de flexión las muestras de 2.00% lograron igualar a la resistencia del diseño Patrón con un promedio de 48 kg/cm^2 (Garrido Domínguez, 2024).

Las investigaciones recientes resaltan que el comportamiento del hormigón reforzado con fibras también depende de las propiedades físicas y mecánicas de los agregados utilizados, tales como la granulometría, absorción y forma de las partículas. como Tarija, donde se dispone de agregados de diversas procedencias y características, resulta estudiar su influencia en combinación con fibras, a fin de obtener mezclas más resistentes y trabajables.

1.1.1 Planteamiento

La fisuración por retracción plástica en losas de hormigón es un fenómeno que afecta directamente la estructura, especialmente en climas cálidos y secos como en Tarija. Esta fisuración depende tanto de las condiciones ambientales como de las propiedades físicas y químicas de los materiales utilizados en la mezcla.

El uso de fibras de vidrio como refuerzo interno ha mostrado ser una alternativa para reducir la fisuración temprana. su eficacia puede variar en función del tipo de agregado utilizado, cuya granulometría, absorción y forma que afectan directamente la trabajabilidad.

Este problema es especialmente crítico en losas de gran superficie, fundaciones sometidas a variaciones térmicas, estructuras expuestas a la humedad y temperatura, así como en elementos de hormigón a la intemperie.

La retracción se produce por la pérdida de humedad del material y está influenciada por múltiples factores, como la relación agua/cemento, la humedad relativa del ambiente, la temperatura y el tipo de mezcla empleada. Asimismo, los

distintos tipos de retracción están directamente asociados con el estado en que se encuentra el hormigón, ya sea en condición fresca o endurecida (Cedeño Cuellar, 2009)

La adición de fibra de vidrio en la mezcla de hormigón se presenta como una alternativa para reducir las fisuras ocasionada por la retracción plástica. Esta estrategia no solo disminuye la tendencia a la fisuración, sino que además fortalece la durabilidad y la confiabilidad de las estructuras de hormigón, ofreciendo una respuesta concreta a uno de los desafíos más frecuentes de la construcción moderna.

Ante ello, surge la necesidad de evaluar comparativamente el comportamiento del hormigón reforzado con fibra de vidrio AR, empleando agregados provenientes de tres bancos, a fin de identificar cuál combinación ofrece mejor aplicación frente a la fisuración por retracción plástica, bajo las condiciones ambientales de Tarija y al conforme a la norma ASTM C1579.

1.1.2 Formulación

¿Cómo influye la adición de fibra de vidrio en la evolución de las fisuras por retracción plástica en losas de hormigón?

La fibra de vidrio debería reducir el índice de fisuración por retracción plástica en las losas de hormigón.

¿Cuál es el efecto del agregado proveniente de tres bancos locales de Tarija en el índice de fisuración del hormigón reforzado con fibra de vidrio AR?

El tipo de agregado puede influir en la fisuración, pero su efecto será confirmado con los ensayos.

¿Qué combinación de agregado y dosificación de fibra de vidrio AR proporciona un mejor control de fisuración temprana bajo las condiciones ambientales de Tarija?

Se espera que una mayor cantidad de fibra y agregados de buena calidad controlen mejor la fisuración.

1.1.3 Sistematización

¿Cuál es la dosificación óptima de fibra de vidrio a incorporar en mezclas de hormigón para controlar la fisuración por retracción plástica, según lo establecido en normas como la ASTM C1579?

La dosificación óptima de fibra de vidrio en hormigón para controlar la fisuración por retracción plástica depende de las características de la fibra y se determina mediante ensayos experimentales que evalúan la reducción del índice de fisuración y la trabajabilidad de la mezcla.

¿Qué diferencias existen entre los agregados provenientes de tres bancos en términos de granulometría, absorción y trabajabilidad del hormigón, y cómo estas diferencias inciden en la fisuración por retracción plástica?

Los agregados pueden variar en granulometría y absorción, afectando la retracción plástica del hormigón; estas diferencias impactan en la formación de fisuras.

¿Qué combinación presenta mayor eficiencia técnica y económica: hormigón con fibra de vidrio utilizando agregados del banco?

La combinación más eficiente técnica y económicamente entre las mezclas con agregados de banco y fibra de vidrio será determinada tras analizar resultados de desempeño y costos en el estudio.

1.2 Objetivos

1.2.1 General

Evaluar el índice de fisuración en losas de hormigón ($f'_{ck} = 250 \text{ kg/cm}^2$) con la adición de fibra de vidrio AR empleando distintas dosificaciones y agregados provenientes de los bancos Tolomosa, San Blas y La Choza en Tarija, mediante la norma ASTM C1579, con el propósito de determinar el índice de fisuración.

1.2.2 Específicos

- Determinar y evaluar las propiedades físicas y mecánicas de los agregados (grava y arena), provenientes de tres bancos, mediante

ensayos de laboratorio, a fin de establecer su comportamiento del hormigón.

- Diseñar y dosificar una mezcla patrón de hormigón ($f'_{ck}=250\text{kg/cm}^2$) utilizando el método ACI 211.1.
- Determinar la resistencia a tracción del hormigón reforzado con adición de vidrio AR, mediante ensayos de tracción en vigas prismáticas de $15\text{ cm} \times 15\text{ cm} \times 50\text{ cm}$, con el fin de analizar el efecto de la fibra sobre el comportamiento mecánico del material.
- Determinar el índice de fisuración por retracción plástica en losas de hormigón elaborado con fibra de vidrio AR, mediante el ensayo ASTM C1579, evaluando parámetros como la cantidad, longitud y ancho de fisuras bajo condiciones ambientales controladas.
- Analizar el comportamiento del hormigón incorporando diferentes dosificaciones de fibra de vidrio (0.40, 0.70, 1.00 y 1.30 kg/m^3) en la mezcla.
- Analizar, comparar y representar gráficamente los resultados obtenidos entre una mezcla patrón de hormigón ($f'_{ck}=250\text{kg/cm}^2$) sin refuerzo y varias mezclas modificadas con fibra de vidrio en proporciones del (0.40, 0.70, 1.00 y 1.30 kg/m^3), Utilizando agregados de tres bancos distintos, Evaluando su comportamiento frente a la fisuración por retracción plástica.
- Determinar los costos de producción de las mezclas de hormigón reforzado con fibra de vidrio en comparación con el hormigón convencional de referencia.

1.3 Justificación

1.3.1 Académica

La investigación tiene como objetivo de evaluar el comportamiento del hormigón ($f'_{ck}=250\text{kg/cm}^2$) frente a la fisuración por retracción plástica mediante la adición de fibra de vidrio AR como refuerzo complementario, utilizando agregados provenientes de los bancos Tolomosa, San Blas y La Choza del departamento de Tarija.

Este estudio se enmarca dentro de las necesidades académicas de fortalecer el conocimiento práctico y experimental en el área de los materiales de construcción. Asimismo, la investigación aportará datos experimentales bajo condiciones reales como (clima, materiales, dosificación y curado), que serán de gran valor como referencia académica para futuros proyectos de grado, tesis e investigaciones, consolidando así el proceso de enseñanza y aprendizaje dentro de la carrera de Ingeniería Civil de la UAJMS.

1.3.2 Técnica

La presente investigación busca aportar soluciones prácticas al problema de la fisuración por retracción plástica en losas de hormigón, que es una de las patologías más comunes en obras civiles, especialmente durante las primeras horas del fraguado. La incorporación de fibra de vidrio en el hormigón permite mejorar la cohesión interna de la mezcla y controlar la aparición y propagación de fisuras superficiales, favoreciendo un comportamiento más resistente en estado plástico. Donde el desempeño de este refuerzo va depender también del tipo de agregado utilizado, lo cual justifica la necesidad de evaluar mezclas de los tres agregados provenientes de los bancos Tolomosa, San Blas y La Choza del departamento de Tarija, con sus propias características físicas y granulométricas.

1.3.3 Social

La presente investigación busca ser un aporte a una construcción más segura, duradera y eficiente en Tarija, promoviendo el uso de materiales como la fibra de vidrio para garantizar estructuras que resistan el paso del tiempo con menor intervención y mayor confianza.

Al reducir la fisuración temprana, se incrementa la vida útil de las losas, disminuyen los requerimientos de mantenimiento y se previenen fallas en estructuras expuestas a condiciones climáticas agresivas.

1.4 Marco referencial

1.4.1 Espacial

La investigación se desarrollará en el Laboratorio de Hormigones de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho (UAJMS), ubicado en la zona de El Tejar, ciudad de Tarija, Bolivia.

Los agregados que se utilizarán en esta investigación serán extraídos de tres bancos ubicados en el departamento de Tarija Tolomosa, San Blas y La Choza los cuales fueron seleccionados por representar los tipos de materiales más utilizados en las construcciones civiles.

1.4.2 Temporal

Este proyecto de investigación tendrá una duración aproximada de cinco meses, comprendida entre los meses de julio y noviembre de 2025, distribuidos en tres fases:

- **Fase de planificación:** Elaboración del cronograma, estimación de recursos materiales y humanos, planificación del laboratorio y adquisiciones.
- **Fase de ejecución:** Diseño de mezclas, preparación de losas y probetas, ejecución de ensayos de fisuración por retracción plástica según norma ASTM C1579, ensayos de resistencia a la compresión y tracción en probetas cilíndricas y prismáticas, recolección de datos y registro sistemático de observaciones para análisis posterior.
- **Fase de evaluación:** Procesamiento de resultados, análisis comparativo, interpretación y redacción de conclusiones y recomendaciones.

1.5 Alcance del estudio

1.5.1 General

El presente estudio busca ver cómo se fisuran las losas de hormigón con fibra de vidrio, usando agregados de los bancos Tolomosa, San Blas y La Choza, en Tarija, siguiendo la norma ASTM C1579.

Se harán mezclas de hormigón con la misma dosificación ($f_c = 250 \text{ kg/cm}^2$), cambiando solo el tipo de agregado y la cantidad de fibra de vidrio que se pone. Se evaluará la cantidad, longitud y ancho de las fisuras en las losas, con el objetivo de identificar qué combinación de agregado y dosificación de fibra de vidrio AR que

reduce mejor la fisuración por retracción plástica, utilizando para ello una cámara ambiental instalada en condiciones controladas.

También se van a probar las propiedades del hormigón, haciendo ensayos de resistencia a la compresión y a la tracción en probetas cilíndricas y prismáticas. Con esto se quiere encontrar la mezcla que aguante mejor y que tenga menos fisuras, para saber qué materiales y qué dosificación de fibra funcionan mejor.

Al final, este estudio va a ayudar a entender de manera práctica cómo los diferentes agregados y la fibra de vidrio afectan la fisuración y la resistencia del hormigón, para poder hacer losas más duraderas y con menos problemas de grietas.

1.5.2 Hipótesis

La adición de fibra de vidrio AR en el hormigón reducirá el índice de fisuración por retracción plástica en losas de hormigón, alcanzando reducciones iguales o superiores al 80 %, en comparación con una mezcla patrón de hormigón convencional sin fibras.

Variables

Hormigón con adición de fibra vidrio AR

- **Variable dependiente:** Reducción de fisuras superficiales en el hormigón causadas por retracción plástica.
- **Variable independiente:** Adición de fibras de vidrio en el hormigón.
- **Variables intervinientes:**
 - ✓ Dosificación del hormigón con fibras
 - ✓ Análisis de trabajabilidad mediante el ensayo del cono de Abrams.
 - ✓ Condiciones ambientales controladas temperatura, humedad relativa, velocidad del viento.

Hormigón Convencional (sin fibras)

- **Variable dependiente:** Comportamiento frente a fisuración por retracción plástica sin adición de refuerzos.
- **Variable independiente:** Proporciones de los componentes de la mezcla de hormigón convencional:
 - ✓ Cantidad de agua.

- ✓ Cantidad de cemento.
- ✓ Cantidad y tipos de áridos.

1.5.3 Resultados a Lograr

- Recopilación de datos sobre el comportamiento del hormigón reforzado con fibra de vidrio incorporando diferentes dosificaciones de fibra de vidrio (0.40, 0.70, 1.00 y 1.30 kg/m³) en la mezcla, y los agregados de tres bancos, en relación con la fisuración por retracción plástica conforme a la norma ASTM C1579.
- Diseño y elaboración de una mezcla patrón de hormigón convencional H-25, mediante el método ACI 211.1, que servirá como referencia para las mezclas modificadas con fibra de vidrio.
- Fabricación y ensayo de losas tanto convencional como modificadas con fibras de vidrio AR, con distintas dosificaciones.
- Comparación de resultados según ASTM C1579, analizando el índice de fisuración por retracción plástica con base en:
 - ✓ Cantidad de fisuras
 - ✓ Longitud total de fisuras
 - ✓ Ancho promedio de fisura
- Determinación del ancho promedio de fisura para cada combinación, con un análisis cuantitativo de la reducción de la fibra de vidrio en el control de fisuración en función del tipo de agregado utilizado.
- Ensayos de resistencia mecánica:
 - ✓ Ensayo de resistencia a la compresión en probetas cilíndricas de 15 cm × 30 cm, para analizar la resistencia diseñada del hormigón.
 - ✓ Ensayo de resistencia a la tracción por flexión en vigas prismáticas de 15 cm × 15 cm × 50 cm, para analizar su comportamiento frente a Resistencia a tracción.
- Análisis económico para determinar cuál combinación de agregado y dosificaciones de fibra de vidrio resulta más eficiente en términos de desempeño y viabilidad.

1.5.4 Aporte Académico

El presente trabajo aporta conocimientos que permiten profundizar sobre el uso de fibras, evaluando distintas dosificaciones, tipos y combinaciones de materiales, con el objetivo de mejorar la tecnología del hormigón y los criterios de diseño de elementos estructurales y no estructurales.

Asimismo, la aplicación práctica de este estudio se extiende directamente al diseño y ejecución de diferentes tipologías constructivas, incluyendo:

losas de entrepiso, losas de fundación, pisos industriales, pavimentos urbanos, veredas, plateas de cimentación, soleras, calzadas peatonales, losas de cobertura, elementos prefabricados, cámaras de inspección, canales revestidos, muros de contención, paneles arquitectónicos y ductos prefabricados para infraestructura urbana.

En todas estas aplicaciones, el control y la reducción de fisuras resulta esencial para mejorar la durabilidad, la estabilidad superficial, la estética arquitectónica y reducir significativamente los costos de mantenimiento y reparación.

1.6 Normativas a Utilizar

La norma de la presente investigación se fundamenta en el uso de normas técnicas nacionales e internacionales reconocidas en el diseño, ensayo y control de calidad del hormigón.

- **ASTM C1579:** Norma principal del estudio, que establece el “Método de prueba estándar para la evaluación de la fisuración por retracción plástica en hormigón reforzado con fibras”. Esta norma regula el procedimiento experimental para determinar el índice de fisuración bajo condiciones controladas de temperatura, humedad y viento.
- **ASTM C33/C33M:** Norma que establece los requisitos para los agregados para concreto, incluyendo sus propiedades físicas, gradación, limpieza y calidad, con el fin de asegurar la durabilidad y resistencia del hormigón.
- **ASTM C192/C192M-16a:** Norma que establece el método estándar para la fabricación y curado de especímenes de hormigón en el laboratorio, asegurando que las probetas sean representativas y uniformes para ensayos de resistencia a compresión, tracción u otras propiedades mecánicas.

- **Método ACI 211:** Método americano para la dosificación de mezclas de hormigón de peso normal, utilizado para determinar las proporciones de materiales.
- **Manual de ensayos de suelos y materiales de hormigón** (Administradora Boliviana de Carreteras, A.B.C.)

Estas normas garantizan que los resultados sean técnicamente correctos y se puedan repetir, lo que permite comparar de forma confiable los distintos tipos de refuerzo utilizados.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO II

MARCO TEORICO

2.1 Introducción

El desarrollo de hormigón ha incrementado significativamente la resistencia y durabilidad del material. Sin embargo, estos avances también han incrementado la tendencia del hormigón a sufrir fisuras tempranas debido a factores como la retracción plástica.

El potencial de agrietamiento a edad temprana del hormigón de alto desempeño aumenta con una disminución en la relación agua-cemento que provoca un mayor aumento de la temperatura, lo que favorece la aparición de fisuras.

La pérdida de agua por evaporación provoca retracción plástica y las tensiones internas, lo que da lugar a grietas tempranas en el mapa de la superficie del hormigón, y el rápido secado de la superficie del hormigón son las principales razones de la contracción plástica en los elementos de hormigón.

Un mayor contenido de árido grueso, el uso de arena muy fina y de alta angularidad, una gradación deficiente de los áridos, aditivos minerales y químicos incompatibles, un curado inadecuado, un acabado tardío, una alta tasa de evaporación de la superficie del hormigón y una caída repentina de la temperatura son las principales causas del agrietamiento por retracción plástica (Safiuddin, 2018).

Una de las manifestaciones más críticas en esta etapa inicial es la fisuración por retracción plástica, la cual ocurre generalmente dentro de las primeras horas posteriores al vaciado. Este fenómeno se origina cuando la evaporación del agua superficial del hormigón supera la velocidad de exudación interna, provocando tensiones internas que exceden la débil resistencia a la tracción del hormigón aún en estado plástico. Factores ambientales como la radiación solar, baja humedad relativa, temperatura elevada y viento contribuyen directamente a acelerar este proceso de secado, afectando la integridad del elemento antes de que el material haya fraguado completamente.

Para abordar esta problemática, se han propuesto diversas estrategias de mitigación, entre ellas la incorporación de fibras como refuerzo interno. En este sentido, la fibra de vidrio ha demostrado ser una alternativa, debido a sus propiedades de alta resistencia a

la tracción, estabilidad química, resistencia a la corrosión y excelente dispersión dentro del hormigón. Estas fibras actúan como elementos de puenteo entre microfisuras, disminuyendo su propagación.

Sin embargo, la fibra en el hormigón no depende únicamente de sus características propias, sino también de las características de los agregados empleados en la mezcla, especialmente su granulometría, absorción y forma.

En Tarija, donde los materiales pétreos varían según su procedencia, resulta fundamental evaluar cómo influye esta variable en conjunto con las fibras, con el objetivo de formular mezclas más adecuadas.

A pesar de los beneficios comprobados del uso de fibras en el hormigón, su implementación en el ámbito constructivo nacional aún es limitada, debido a la persistencia de métodos tradicionales y a la falta de información técnica específica. Por ello, el presente estudio busca evaluar experimentalmente la influencia de la fibra de vidrio en la reducción de fisuras por retracción plástica en losas de hormigón H-25, utilizando agregados de tres bancos distintos del departamento de Tarija y aplicando la metodología estandarizada de la norma ASTM C1579. Asimismo, se pretende establecer la dosificación óptimo de fibra que permita mejorar la resistencia y la reducción de fisuras.

2.2 Fisuración

Las fisuras y grietas son discontinuidades que aparecen en elementos estructurales como losas, placas, vigas, columnas, taludes, etc., y de alguna forma alertan un suceso que puede comprometer la serviciabilidad y durabilidad de las estructuras. El estudio sobre su aparición debe abordarse con prontitud, dado que están relacionadas con una variedad de causas debido a la casi nula resistencia a la tracción del concreto fresco y endurecido.

Las fisuras son aberturas de ancho de hasta de 1mm que afectan solamente a la superficie de una estructura de concreto, y su aparición está ligada a cambios de humedad, temperatura y al estado tensional de las armaduras. Mientras que las grietas, son aberturas cuyo ancho es mayor a 1mm que afectan a la estructura de concreto en todo su espesor. Aparecen en cualquier elemento estructural o de cerramiento, estando

asociada con el movimiento del suelo, reparto defectuoso de las cargas no previstas, sobrecargas, variaciones térmicas, entre los principales factores (Sotomayor C., 2020).

Por su parte, cuando las discontinuidades superan el milímetro de ancho y atraviesan la totalidad del espesor del elemento, se las clasifica como grietas estructurales, las cuales sí afectan de forma significativa la integridad del sistema portante.

Las fisuras pueden presentarse en cualquier componente estructural, ya sea por esfuerzos inducidos por cargas permanentes o accidentales, deformaciones impuestas, asentamientos diferenciales del suelo, movimientos térmicos, contracciones del material, o una inadecuada distribución del refuerzo. Sin embargo, en elementos horizontales delgados como las losas, las fisuras por retracción plástica son una de las formas más comunes y críticas de deterioro prematuro.

Las fisuras por retracción plástica se desarrollan en las primeras horas después del vaciado del hormigón, cuando aún se encuentra en estado plástico. Estas fisuras por contracción plástica aparecen en la superficie del hormigón fresco poco después de su colocación y mientras aún es plástico. Estas fisuras aparecen principalmente en superficies horizontales. Suelen ser paralelas entre sí, con una separación de entre 30 y 90 cm, relativamente superficiales y, por lo general, no intersecan el perímetro de la losa. El agrietamiento por contracción plástica es más probable cuando las altas tasas de evaporación provocan que la superficie del hormigón se seque antes de su fraguado.

Las fisuras por retracción plástica son antiestéticas, pero rara vez afectan la resistencia de los pisos y pavimentos de concreto. Sin embargo, estas grietas pueden permitir la penetración de otros productos químicos agresivos que afectan la durabilidad y son puntos débiles para la aparición de grietas posteriores por otras razones. El desarrollo de estas grietas se puede minimizar si se toman las medidas adecuadas antes y durante la colocación y el acabado del concreto (National Ready Mixed Concrete Association, 2021).

El presente estudio busca evaluar el comportamiento fisurativo del hormigón H-25 reforzado con fibra de vidrio, mediante un enfoque experimental controlado, con el fin de reducir la aparición de fisuras por retracción plástica. Asimismo, se analizará

la influencia del tipo de agregado empleado en la mezcla extraído de los bancos Tolomosa, San Blas y La Choza del departamento de Tarija, considerando que las propiedades físicas de los áridos pueden aumentar o reducir el riesgo del hormigón a este tipo de fisuración.

2.2.1 Clasificación

El control y monitoreo de las fisuras en estructuras de hormigón es fundamental para evaluar su evolución en el tiempo y su impacto potencial en la durabilidad y seguridad de los elementos.

Una correlación entre las fisuras y grietas con el nivel de riesgo en las estructuras aborda los estudios de vulnerabilidad y patología. En la tabla 2.1, se presenta una clasificación de fisuras y grietas en función a su ancho y al nivel de repercusión en las estructuras expuestas sobre todo para ambientes agresivos y sustancias nocivas.

Una de las formas más comunes de clasificación es en función del ancho de apertura de la fisura (e), el cual permite estimar su grado de repercusión estructural (Sotomayor C., 2020).

Tabla 2.1

Clasificación de fisuras según su ancho (e) y grado de repercusión en la estructura

Clasificación	Ancho (e)	Repercusión estructural
Micro fisuras	$e < 0.05$ mm	Nivel muy bajo
Fisuras	$0.10 \text{ mm} < e < 0.20$ mm	Nivel bajo. Tener cuidado con ambientes marinos u otros agresivos donde pueda desencadenarse la corrosión del acero.
Macro fisuras	$0.20 \text{ mm} < e < 0.40$ mm	Nivel moderado. Podría existir repercusiones estructurales, se requiere estudio de vulnerabilidad para el diagnóstico y alternativas de reparación y/o reforzamiento en caso lo amerite.

Grietas	$0.40 \text{ mm} < e < 1.00 \text{ mm}$	Nivel alto. Podría existir reducción de la capacidad sismo resistente. Se requiere estudio de vulnerabilidad para el diagnóstico, y alternativas de reparación y/o reforzamiento en lo aplicable.
	$e > 1.00 \text{ mm}$	Nivel muy alto. Posible reducción significativa de la capacidad sismo resistente. Se requiere estudio de vulnerabilidad para el diagnóstico y determinar la posibilidad de salvar la estructura. Dependiendo de los daños encontrados, se debe evaluar la evacuación y apuntalamiento de la edificación.

Fuente: Sotomayor, C. (2020).

Por otro lado, diversos códigos y guías de diseño establecen límites máximos permisibles para el ancho de fisura, dependiendo de la condición de exposición ambiental a la que estará sometida la estructura. Estos límites buscan garantizar la durabilidad del hormigón armado, sobre todo frente a ataques de agentes externos como cloruros, sulfatos, ciclos de congelamiento y descongelamiento, entre otros.

ACI 224.R-01 limita el ancho máximo de las fisuras y grietas en las estructuras de concreto sometidas a flexión para diferentes condiciones de exposición de clima y agresividad química (Tabla 2.2).

Tabla 2.1

Ancho máximo en estructuras sometidas a flexión (ACI 224.R-01, 2008)

Condición de exposición	Ancho máximo de fisura permitido
Aire seco o membrana protectora	0.41 mm
Humedad o aire húmedo, contacto con suelo	0.30 mm
Presencia de productos químicos des congelantes	0.18 mm
Ambientes marinos: agua de mar, rocío, ciclos húmedo-seco	0.15 mm
Estructuras para retención de agua	0.10 mm

Fuente: Sotomayor, C. (2020).

En el caso específico de las fisuras por retracción plástica, estas generalmente se presentan como microfisuras o fisuras finas ($< 0.20 \text{ mm}$), pero su desarrollo progresivo puede derivar en macrofisuras si no se controlan adecuadamente. Por tanto, su prevención durante las primeras horas del fraguado resulta fundamental, especialmente en climas cálidos.

2.3 Fisuración en el Hormigón

La fisuración en el hormigón ocurre cuando las tensiones internas exceden la resistencia a tracción del material, y puede manifestarse tanto en el estado fresco como en el endurecido. Su aparición es un fenómeno complejo, influenciado por múltiples factores mecánicos, como cargas externas, asentamientos diferenciales, deformaciones impuestas y esfuerzos térmicos, así como por factores ambientales, incluyendo alta temperatura, baja humedad relativa, viento y exposición a agentes agresivos. La combinación de estos factores puede provocar la formación de fisuras superficiales o internas, comprometiendo la durabilidad, la integridad y la vida útil de los elementos estructurales de hormigón, especialmente en losas delgadas y elementos expuestos. Este fenómeno es complejo, ya que su aparición puede deberse a múltiples factores combinados, tanto de naturaleza mecánica como ambiental, entre los cuales destacan:

- **Tensiones internas:** Generadas por retracción, asentamientos diferenciales, exudación inadecuada o fricción con elementos adyacentes. Si estas tensiones superan la resistencia a tracción del hormigón, se originan fisuras.
- **Variaciones térmicas:** Cambios significativos de temperatura pueden provocar expansión o contracción del material. Esta dilatación o retracción térmica suele generar fisuración, especialmente en estructuras sin juntas de control adecuadas o con restricciones.
- **Pérdida de humedad:** Un secado acelerado del hormigón, particularmente en las primeras horas tras el vaciado, da lugar a un fenómeno conocido como retracción plástica, generando fisuras superficiales. Este tipo de fisuración es muy común en climas cálidos y secos.
- **Sobrecargas o diseño deficiente:** Si la estructura es sometida a cargas mayores a las previstas, o si presenta errores en su diseño estructural (como refuerzo

insuficiente), pueden aparecer fisuras estructurales que comprometen la seguridad.

En la Tabla 2.3 se presentan de manera resumida algunas de las principales causas de fisuración en el hormigón durante su estado fresco, es decir, antes del fraguado final, cuando el material aún no ha desarrollado su resistencia mecánica. Estas fisuras se originan principalmente por pérdida prematura de agua, variaciones térmicas o condiciones ambientales adversas que afectan la cohesión del material en sus primeras horas.

Tabla 2.2

Presencia de fisuras en el estado fresco del hormigón

Estado del Hormigón	Causas principales de fisuración
Hormigón fresco	Pérdida prematura de agua por evaporación superficial.
	Pérdida de agua por contacto con sustrato absorbente.
	Retracción por secado en condiciones calurosas o secas.
	Oscilaciones térmicas día-noche o estacionales.
	Ciclos de humedecimiento y secado.

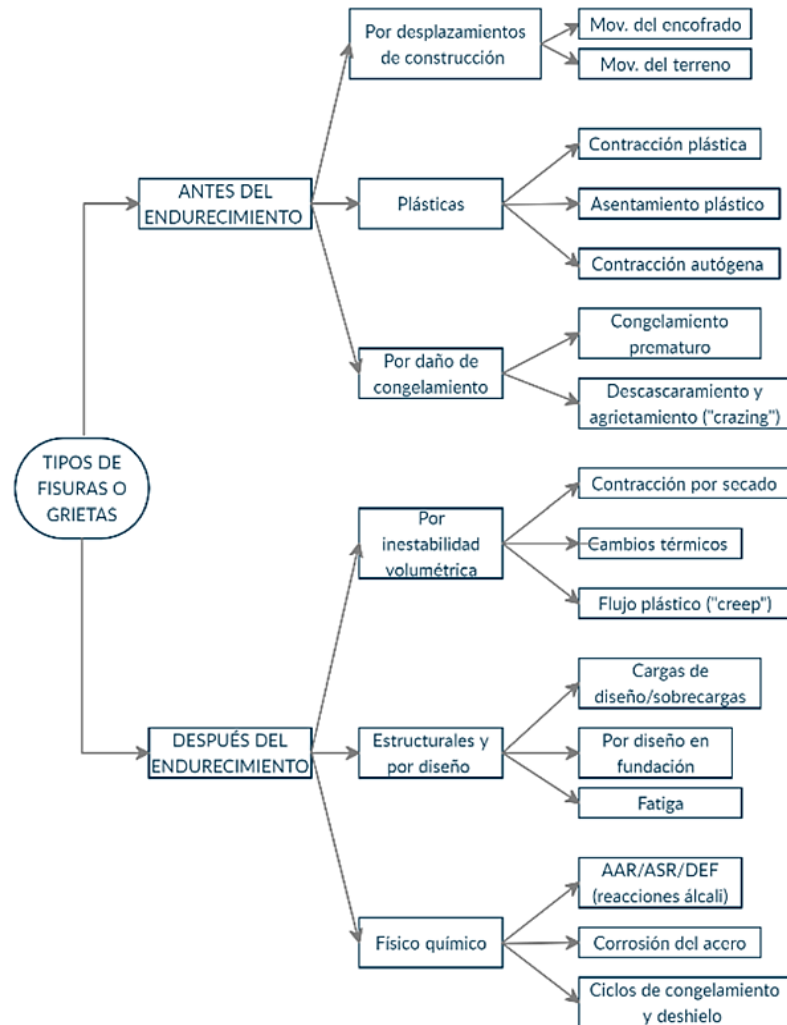
Fuente: Adaptado de Mehta y Monteiro (2014).

Una de las alternativas más efectivas para mitigar la fisuración temprana es la incorporación de fibras sintéticas, como la fibra de vidrio, que contribuye a mejorar la cohesión de la mezcla, controlar la aparición y propagación de microfisuras y aumentar la resistencia del hormigón durante sus primeras horas de vida. Evaluar esta estrategia, en combinación con el uso de agregados provenientes de bancos del departamento de Tarija, constituye el propósito principal del presente estudio.

2.3.1 Tipos de Fisura en el Hormigón

Figura 2.1

Tipos de fisura del hormigón



Fuente: Adaptado de Sotomayor (2020),

Durante las primeras horas tras el vaciado del hormigón, este se encuentra en estado plástico, es decir, aún no ha iniciado el fraguado ni alcanzado ninguna resistencia significativa. En este periodo, el material puede desarrollar fisuras superficiales, las cuales pueden desarrollarse por múltiples mecanismos que actúan en conjunto con factores ambientales, geométricos y constructivos. A continuación, se describen las principales causas de fisuración en el estado fresco:

- **Fisuración por retracción plástica (Contracción Plástica)**

La fisuración por retracción plástica ocurre cuando el concreto está en estado plástico y experimenta una pérdida rápida de humedad en su superficie debido a factores como altas temperaturas, baja humedad relativa y viento constante. Esta evaporación excesiva genera tensiones internas que superan la resistencia a tracción del material, resultando en grietas superficiales.

- **Fisuración por asentamiento plástico**

Este tipo de fisuración se presenta entre 10 minutos y tres horas después del vaciado del concreto. Se debe al asentamiento del material fresco, donde las partículas más pesadas tienden a sedimentarse, desplazando el agua hacia la superficie. Si el recubrimiento de las armaduras es insuficiente o el asentamiento es elevado, pueden formarse grietas en la superficie.

- **Fisuras por movimiento del encofrado**

Las fisuras por movimiento del encofrado se generan cuando el encofrado no está adecuadamente apuntalado o presenta movimientos durante el fraguado del concreto. Estos desplazamientos pueden inducir tensiones en el material, originando grietas que afectan la integridad superficial del hormigón.

- **Fisuración por contracción autógena**

La contracción autógena se produce en hormigones con baja relación agua/cemento, donde la hidratación del cemento consume el agua disponible en los poros capilares. Este consumo interno de agua genera una reducción de volumen sin la intervención de factores externos, provocando tensiones internas que pueden resultar en fisuras (Segeer, 2019)

2.4 Retracción Plástica

Generalmente esta sobre las superficies de pisos y losas aparecen fisuras por retracción plástica no deseadas si las condiciones de trabajo son tan secas que la humedad sale de la superficie de hormigón más rápido de lo que es reemplazada por el agua de exudación. Estas fisuras ocurren antes del inicio del curado y pueden ocurrir ya sea antes o después del acabado final. La superficie de hormigón se contrae a medida que pierde humedad, provocando tensiones de tracción en el hormigón débil,

rigidizante y plástico que ocasionan fisuración irregular sobre la superficie. Generalmente estas fisuras son anchas en la superficie, pero su profundidad es de apenas unos pocos milímetros, aunque en los pavimentos pueden aparecer fisuras muy profundas. La longitud de las fisuras va de unos pocos milímetros a unos cuantos metros.

Algunas veces las fisuras por retracción plástica aparecen lo suficientemente temprano como para ser eliminadas posteriormente usando una llana o fratás. Si esto ocurre se recomienda posponer estas operaciones tanto como sea posible para obtener el máximo beneficio sin recurrencia de las fisuras.

En otros casos el uso temprano de la llana puede destruir la tracción creciente, retrabajando el mortero superficial e impidiendo la fisuración plástica. Apenas aparezcan las fisuras, si el estado del hormigón aún lo permite, se debería intentar cerrar las fisuras mediante apisonado o golpeando con una llana. Si las fisuras se cierran firmemente es poco probable que vuelvan a aparecer. Sin embargo, si apenas se pasa un fratás sobre la superficie del hormigón, las fisuras pueden aparecer nuevamente. En cualquier caso, el curado se debe iniciar tan pronto como sea posible.

Es más probable que haya fisuración por retracción plástica cuando las condiciones ambientales, temperaturas del hormigón y dosificación de la mezcla se combinan de manera tal de provocar una rápida pérdida de la humedad superficial disponible. Estas condiciones se pueden desarrollar tanto en tiempo caluroso como en tiempo frío cuando se combinan los siguientes factores: baja humedad, altas velocidades del viento y una superficie de hormigón tibio. De acuerdo con el Comité (American Concrete Institute (Comité ACI 224), 2001).

2.4.1 Causa de la Fisuración Provocada por la Retracción por Secado

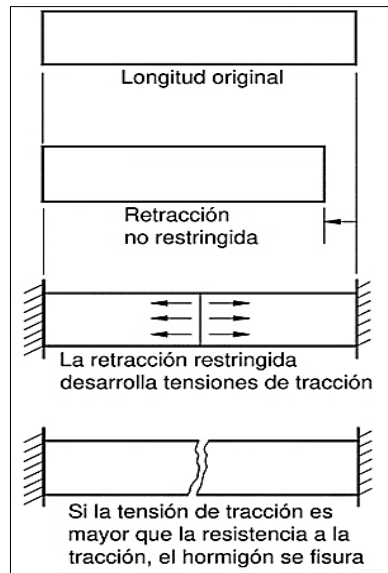
La contracción (debida a la retracción por secado) de un componente de hormigón de una estructura siempre está sujeta a algún grado de restricción por parte de las fundaciones, otra parte de la estructura o las armaduras de acero empotradas en el hormigón. La combinación de retracción y restricción desarrolla tensiones de tracción dentro del hormigón.

Debido a la baja resistencia a la tracción inherente al hormigón, con frecuencia habrá fisuración (Figura 2.2).

De la retracción no uniforme surge un grado de restricción adicional. Como el secado ocurre de manera no uniforme desde la superficie hacia el núcleo del hormigón, la fisuración creará tensiones de tracción internas próximas a la superficie y compresiones en el núcleo. La retracción diferencial puede provocar alabeo y fisuras superficiales. Con el tiempo, las fisuras superficiales pueden penetrar más profundamente en el miembro de hormigón, a medida que la parte interna está sujeta a retracción adicional (American Concrete Institute (Comité ACI 224), 2001)

Figura 2.2

Fisuración del hormigón provocada por la retracción por secado



Fuente: ACI-244R, 2001.

2.4.2 Fisuración por Retracción Plástica

La fisuración por retracción plástica es un tipo de grieta que se forma en la superficie del concreto fresco antes de que haya fraguado completamente, mientras aún se encuentra en estado plástico. Se produce como resultado de la reducción de volumen del concreto causada por la rápida pérdida de agua en su superficie, un fenómeno conocido como retracción plástica. Esta pérdida de humedad puede ser acelerada por factores ambientales como altas temperaturas del aire y del concreto, baja humedad

relativa y la presencia de viento constante, así como por características del propio concreto, como una relación agua/cemento elevada o un contenido insuficiente de agregados finos.

Cuando la tasa de evaporación de agua superficial supera la capacidad del concreto para reemplazarla mediante exudación, se generan tensiones internas que exceden la limitada resistencia a tracción del concreto fresco. Estas tensiones provocan la aparición de grietas superficiales, principalmente en superficies horizontales como losas, pavimentos y pisos industriales. Las fisuras por retracción plástica pueden variar en longitud, separación y patrón, y aunque inicialmente son superficiales, si no se controlan adecuadamente pueden afectar la durabilidad y estética de la estructura. La fisuración por retracción plástica está estrechamente asociada con la tasa de pérdida de humedad en relación con la tasa de reposición por exudación. Factores clave que influyen en esta pérdida incluyen:

- Temperatura del aire y del hormigón,
- Humedad relativa ambiente,
- Velocidad del viento en la superficie del hormigón, y
- Cantidad de agua exudada.

2.4.3 Características de la Retracción Plástica

Las fisuras por retracción plástica presentan una serie de características particulares que permiten identificarlas y diferenciarlas de otros tipos de fisuración.

- **Como identificarlas:** Las fisuras son generalmente erráticas y en algunos casos pueden seguir la dirección predominante del viento, pero no presentan un patrón tan definido como en el caso de las fisuras por asentamiento plástico, siendo este aspecto una herramienta muy útil para su identificación en obra.

La longitud de las fisuras va generalmente de 10 centímetros (cm) a 3 metros (m) y se espacian de 15 a 90 cm, no apareciendo en general en el perímetro de losas. Las fisuras más largas se presentan generalmente orientadas con la dirección del viento y paralelas entre sí. En muchos casos presentan una forma característica de ‘pata de gallo’, uniéndose tres fisuras de manera radial. La abertura de las fisuras llega en algunos casos a 3 mm y la profundidad normal

varía de 2,5 a 7,5 cm, y en pocos casos se presentan en la totalidad del espesor de la losa. En este caso las fisuras pueden atravesar toda la losa si se hormigonó en condiciones muy adversas y no se protegió el hormigón fresco, ya que pueden trabajar como juntas no previstas, debilitando la sección del hormigón a las pocas horas y mucho antes del aserrado de las misma (Segerer, 2019).

- **Aparición de las fisuras por contracción plástica:** La fisuración por contracción plástica aparece en la superficie del hormigón fresco poco tiempo después de la colocación, mientras se está acabando el hormigón o después de esta tarea, aproximadamente entre 1 a 3 horas del colado del hormigón. Estas fisuras aparecen principalmente en superficies de losas, pavimentos y pisos industriales y se las puede eliminar si se toman medidas preventivas, fundamentalmente en lo que respecta a las tareas de protección y curado. Estas fisuras son características de las superficies en contacto con el ambiente, no apareciendo en elementos encofrados como columnas o tabiques. De allí la importancia que tienen en elementos como pisos industriales y losas, ya que su reparación, por más sencilla que sea, insumirá muchos más recursos que las medidas preventivas que pueden adecuarse a cada caso en particular (Segerer, 2019).
- **Alta sensibilidad a condiciones ambientales:** La formación de estas fisuras está fuertemente influenciada por la temperatura, la humedad relativa y el viento. Son más frecuentes y severas en climas cálidos, secos y ventosos, donde la evaporación del agua superficial es rápida.
- **Distribución aleatoria en elementos de espesor uniforme:** En losas de espesor constante, las fisuras se presentan con trazos cortos y direcciones aleatorias, sin una orientación predominante, formando un patrón de craqueo superficial.
- **Concentración en zonas delgadas:** En elementos con variaciones de espesor, como zonas con recortes, embebidos o canalizaciones, las fisuras tienden a concentrarse en las secciones más delgadas, debido a la mayor susceptibilidad a la pérdida de humedad y a la generación de tensiones.

Estas características serán observadas y evaluadas experimentalmente durante la aplicación del ensayo ASTM C1579, lo que permitirá cuantificar el índice de fisuración en función del tipo de agregado, dosificación de fibra de vidrio AR y condiciones ambientales simuladas.

2.5 Hormigón Reforzado con Fibras (HRF)

El concepto en que se basa el hormigón reforzado con fibras (HRF) es en cierto modo semejante al del hormigón armado convencional, “cosiendo” las fisuras que pueden producirse y que dejarían a la estructura fuera de servicio. La diferencia está en que, en lugar de unas pocas barras, de diámetro relativamente grande y orientadas según una dirección determinada, en el HRF el refuerzo está constituido por infinidad de fibras de pequeño diámetro y aleatoriamente orientadas, a las cuales se transfieren los esfuerzos cuando la matriz empieza a fisurarse.

Se ha observado que la incorporación de fibras al hormigón mejora la respuesta frente a la fisuración y reduce la fragilidad del mismo. Esto también se puede interpretar como un aumento de la tenacidad del material (habilidad que tiene el material para absorber energía durante la deformación plástica sin que se produzca la fractura), resultando el hormigón con fibras especialmente adecuado para sobrellevar acciones dinámicas o prevenir situaciones donde se requiera el control de los procesos de fisuración. Este fuerte aumento de la tenacidad es una de las características más apreciadas de los hormigones reforzados con fibras (Pujadas Álvarez, 2008).

Organismos internacionales como el American Concrete Institute (ACI) y la ASTM International han establecido lineamientos normativos y métodos de ensayo específicos para evaluar el desempeño del hormigón con fibras. Entre estos, destaca la norma ASTM C1579, utilizada en este estudio para medir el índice de fisuración por retracción plástica en hormigón reforzado con fibra de vidrio.

El hormigón, por naturaleza, es un material con excelente resistencia a la compresión, pero limitado frente a resistencia a tracción y expuesto a la aparición de fisuras superficiales, especialmente en sus primeras horas de fraguado. Tradicionalmente, estos esfuerzos son absorbidos mediante armaduras convencionales (acero corrugado), como ocurre en el hormigón armado o pretensado. Sin embargo, en

elementos que requieren una mejora del comportamiento en estado fresco o temprano, el uso de fibras ofrece una alternativa complementaria muy eficiente.

A lo largo de la historia, se han utilizado fibras naturales (vegetales, animales) en compuestos frágiles como morteros de barro o yeso. Actualmente, el desarrollo de materiales compuestos ha permitido incorporar fibras sintéticas, metálicas, minerales y de vidrio en matrices de hormigón, cerámicas, epóxicas y polímeros, mejorando notablemente su desempeño físico mecánico.

En el caso del Hormigón Reforzado con Fibras (HRF), la adición de fibras cortas y distribuidas aleatoriamente en toda la masa del hormigón incrementa la tenacidad, ductilidad y resistencia a la formación y propagación de fisuras, especialmente en la etapa plástica. Estas fibras actúan como puentes de transferencia de tensiones, controlando la apertura de fisuras y distribuyendo mejor las cargas internas.

2.5.1 Efecto de las Fibras Sobre las Fisuras

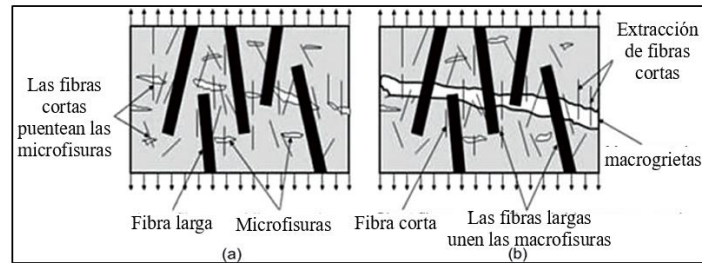
La incorporación de fibras en el hormigón tiene un efecto significativo sobre la formación y propagación de fisuras, especialmente durante las primeras horas de fraguado:

- Las fibras actúan como puentes de transferencia de tensiones, limitando la apertura de fisuras iniciales y distribuyendo de manera más uniforme las cargas internas.
- Incrementan la tenacidad y ductilidad, permitiendo que las deformaciones se absorban sin generar fisuras visibles prematuras.
- Mejoran la resistencia a tracción y la durabilidad superficial, reduciendo el riesgo de fisuración por retracción plástica o asentamiento.
- Su efectividad depende del tipo de fibra, del porcentaje de incorporación, de su distribución dentro de la mezcla y de la compatibilidad.

Actualmente, el mercado ofrece una amplia variedad de fibras para reforzar el hormigón, clasificadas principalmente según su origen en: naturales, sintéticas, metálicas y minerales. Cada tipo presenta propiedades físico mecánicas distintas que influyen en la respuesta del hormigón frente a fisuración, impacto, tracción, abrasión y durabilidad.

Figura 2.3

Efecto de las fibras sobre las fisuras



Fuente: Papel de micro y macro fibras en el hormigón. (I. Markovic, 2007)

La tabla 2.4 presenta información sobre el origen de las fibras y sus propiedades mecánicas resistencia a tracción, módulo de Young, alargamiento a la rotura, densidad y diámetro, así como su influencia en el comportamiento del hormigón, especialmente en el control de fisuración, la mejora de la tenacidad y ductilidad, y la resistencia frente a impactos y abrasión.

Tabla 2.3

Tipos de fibras y sus propiedades mecánicas

Tipo de fibra	Diámetro (mm)	Densidad (kg/m³)	Resistencia a tracción (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Alargamiento de rotura (%)
Acrílico	0,02 – 0,35	1100	200 – 400	2	1,1
Asbesto	0,0015 – 0,02	3200	600 – 1000	83 – 138	1 – 2
Algodón	0,2 – 0,6	1500	400 – 700	4,8	3 – 10
Vidrio	0,005 – 0,15	2500	1000 – 2600	70 – 80	1,5 – 3,5
Grafito	0,008 – 0,009	1900	1000 – 2600	230 – 415	0,5 – 1
Aramida	0,01	1450	3500 – 3600	65 – 133	2,1 – 4
Nylon	0,02 – 0,4	1100	760 – 820	4,1	10
Poliéster	0,02 – 0,4	1400	720 – 860	83	11 – 13
Polipropileno	0,02 – 1,0	900 – 950	200 – 760	3,5 – 15	5 – 25
Polivinil	0,027 – 0,66	1300	900 – 1600	23 – 40	7,0
Parbon	-	1400	4000	230 – 240	1,4 – 1,8
Rayón	0,02 – 0,38	1500	400 – 600	6,9	10 – 25
Basalto	0,0106	2593	990	7,6	256
Polietileno	0,025 – 1,0	960	200 – 300	5,0	3
Sisal	0,08 – 0,3	760 – 1100	228 – 800	11 – 27	2,1 – 4,2
Coco	0,11 – 0,53	680 – 1020	108 – 250	2,5 – 4,5	14 – 41
Yute	0,1 – 0,2	1030	250 – 350	26 – 32	1,5 – 1,9
Acero	0,15 – 1,0	7810	345 – 3000	200	4 – 10

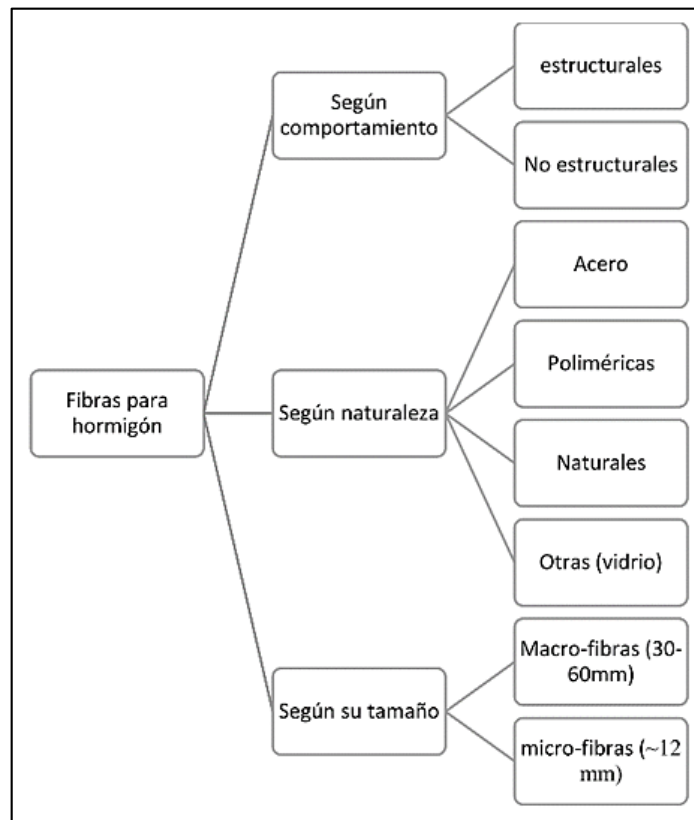
Fuente: Pujadas Álvarez, P. (2016).

Entre las opciones, la fibra de vidrio se destaca por su equilibrio en resistencia, módulo de elasticidad y alargamiento, lo que la convierte en una alternativa eficaz para controlar la fisuración por retracción plástica sin afectar la trabajabilidad del hormigón ni generar problemas de corrosión, como ocurre con las fibras metálicas, asegurando un refuerzo eficiente durante las primeras horas de fraguado.

Las fibras se pueden clasificar según su comportamiento en fibras estructurales y no estructurales, las primeras se pueden tener en cuenta en los cálculos de la sección mientras que las segundas se utilizan para mejorar algunas propiedades del hormigón sin tenerlas en cuenta en los cálculos. También se pueden clasificar según su naturaleza como fibras de acero, poliméricas, de vidrio, etc. cada una con características físico mecánicas específicas que influyen en el desempeño del hormigón reforzado (Carné García, 2016)

Figura 2.4

Clasificación de las fibras para hormigón



Fuente: García, I. C. (2016).

2.5.2 Comportamiento Mecánico

Los hormigones reforzados con fibras presentan una mayor deformación frente a los hormigones sin refuerzo, de manera que, cuando se alcanza la carga de rotura, comienzan a trabajar las fibras que, generalmente, tienen buena resistencia a tracción, y ayudan a que no se propague la fisura en el hormigón (Carné García, 2016).

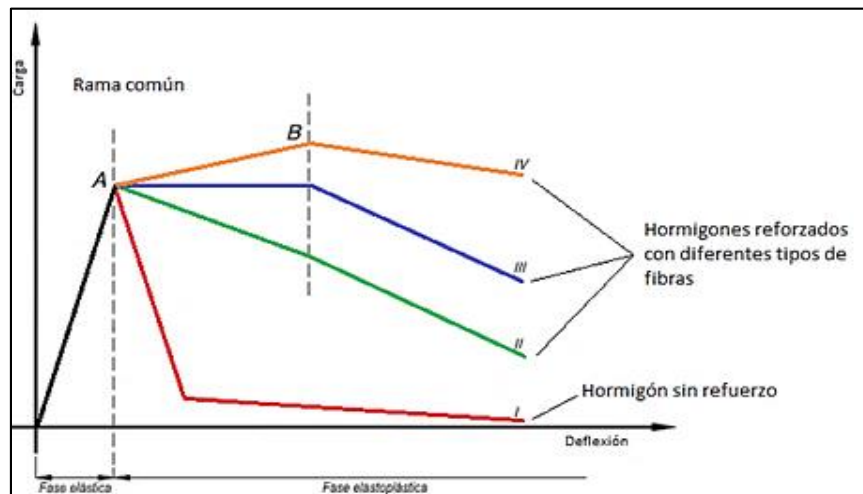
En comparación con el hormigón sin fibras, el HRF:

- Aumenta la energía de fractura (tenacidad).
- Disminuye la apertura y propagación de fisuras.
- Mejora el comportamiento en estado plástico y endurecido.
- Incrementa la ductilidad, evitando colapsos frágiles.

Este comportamiento es especialmente relevante durante las primeras horas posteriores al vaciado de losas, donde las tensiones por retracción plástica pueden inducir fisuras superficiales.

Figura 2.5

Efecto de las fibras sobre el comportamiento del hormigón

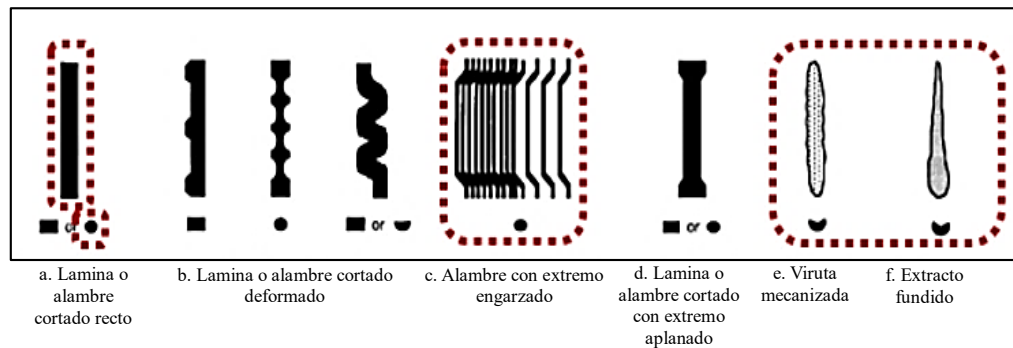


Fuente: García, I. C. (2016).

La geometría de las fibras también tiene un peso importante en el comportamiento del hormigón. Existen fibras lisas, dobladas, laminadas, trefiladas, etc.

Figura 2.6

Posibles geometrías para fibras metálicas



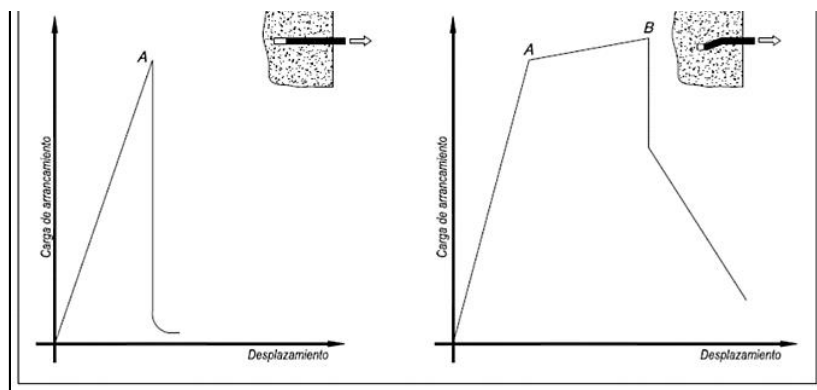
Fuente: García, I. C. (2016).

Se debe tener en cuenta este factor dependiendo del uso que se le vaya a dar al hormigón, puesto que una fibra lisa mostrará menos adherencia que una fibra doblada o rugosa.

Esto lleva a un factor importante; el comportamiento de las fibras cuando se alcanza la rotura de la pieza de hormigón. Una fibra doblada en los extremos no se comportará igual que una fibra recta. Si la fibra no tiene un buen comportamiento a tracción, se quebrará bruscamente reduciendo significativamente la absorción de energía. Esto se comprende mejor observando las gráficas de la Figura (Carné García, 2016).

Figura 2.7

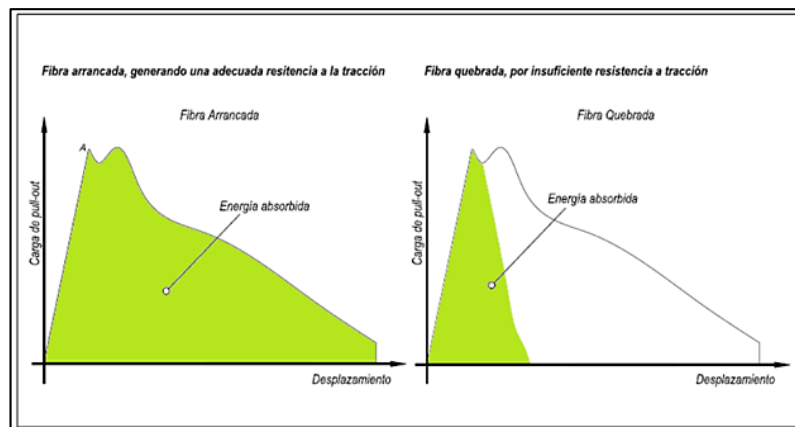
Influencia de la geometría de las fibras



Fuente: García, I. C. (2016).

Figura 2.8

Influencia de la resistencia a tracción de las fibras sobre la energía absorbida



Fuente: García, I. C. (2016).

2.5.3 Fibras Sintéticas

Las fibras sintéticas han sido desarrolladas específicamente para su uso en mezclas de hormigón, debido a su alta resistencia a la alcalinidad del medio cementicio y su buena compatibilidad química a largo plazo. Estas fibras se incorporan antes o durante el mezclado del hormigón y, en proporciones adecuadas, no requieren ajustes significativos en el diseño de mezcla, lo cual las hace prácticas y versátiles.

Una de sus principales ventajas es que, al estar compuestas por polímeros como polipropileno, nylon o alcohol de polivinilo (PVA), no sufren corrosión, lo que las convierte en una alternativa atractiva frente a las fibras metálicas en ambientes agresivos o con alta humedad.

La norma UNE-EN 14889-2 clasifica las fibras sintéticas en dos grupos principales:

- Macrofibras: Diámetro $\geq 0,3$ mm.
- Microfibras: Diámetro $< 0,3$ mm y longitudes típicas alrededor de 12 mm.

Ambos tipos se utilizan con distintos fines dentro del hormigón, dependiendo de si se busca una función estructural o de control del comportamiento en estado fresco.

2.5.3.1 Macro-fibras Sintéticas

Las macro-fibras están orientadas principalmente a mejorar el comportamiento estructural del hormigón endurecido. Aunque la norma establece un tamaño mínimo de

0,3 mm de diámetro y 30 mm de longitud, las macro-fibras comerciales suelen tener diámetros cercanos a 1 mm y longitudes de 40 a 50 mm (Figura 2.9).

Estas fibras se utilizan como refuerzo secundario o incluso como sustituto parcial del acero tradicional en elementos estructurales, mejorando la capacidad en estado fisurado del hormigón, su ductilidad y su tenacidad.

Para que una macrofibra sintética pueda ser considerada estructural, debe cumplir con los requisitos de desempeño especificados en la normativa correspondiente, incluyendo resistencia a tracción, adherencia con la matriz cementicia y comportamiento frente a cargas repetidas (Carné García, 2016).

Figura 2.9

Aspecto de macro-fibras sintéticas comerciales



Fuente: García, I. C. (2016).

2.5.3.2 Micro-fibras Sintéticas

Estas fibras se caracterizan por tener una cantidad de fibras por kg aproximadamente $2 \cdot 10^3$ veces mayor que las macro fibras sintéticas, sin embargo, carecen de carácter estructural. Este tipo de fibras, denominadas también monofilamento, actúan reteniendo en la masa de hormigón tanto los sólidos, como el agua, de forma que evitan que gran parte del agua se eleve a la superficie libre de hormigón y se evapore rápidamente, dando lugar a la retracción y, en consecuencia, a la fisuración del hormigón.

Otra de las aplicaciones de este tipo de fibras es la de aumentar la resistencia al fuego, al tener un gran número de fibras por kg, estas se distribuyen por toda la masa de hormigón, de forma que, a altas temperaturas, la fibra desaparece, proporcionando una

red capilar a través de la cual se evapora fácilmente el agua evitando el estallido del hormigón (Carné García, 2016).

Figura 2.10

Aspecto de microfibras sintéticas comerciales



Fuente: García, I. C. (2016).

2.5.3.3 Fibras de Vidrio

Fibra de vidrio es vidrio en forma de filamentos. Los filamentos pueden ser hechos con diversos tipos de vidrio, designados con las letras A, E, C, AR y S. Los más comúnmente utilizados para refuerzo de productos son los tipos E (eléctrico), AR (Alcali Resistente) y C (con resistencia química)

El proceso mediante el cual se producen los filamentos de vidrio es el sgte. en un reactor son incorporados todas las materias primas finamente divididas en forma de polvo, donde son fundidas. El vidrio fundido fluye a través de canales que tienen gran cantidad de pequeños hoyos. El vidrio fundido sale desde estos hoyos como un filamento continuo. Estos filamentos continuos pasan sobre un aplicador que les impregna con un cubrimiento químico (o apresto) el cual le dará características especiales para su procesamiento posterior. Este apresto aumenta la habilidad del vidrio para adherirse a otros materiales y es muy importante para determinar la calidad del material. Los filamentos así tratados son curados en estufas para terminar su procesamiento (Manual para uso de fibra de vidrio)

2.5.3.4 Tipos de Fibra Vidrio

Existen diversos tipos de fibras de vidrio, clasificados en función de su composición química, resistencia a los agentes químicos, forma de presentación y aplicaciones. Para su uso en hormigón, los tipos más relevantes son Ver Anexo I:

- **VIDRIO AR: (resistente a álcali).** - Vidrio álcali-resistente, es el único que puede combinarse debido a su característica resistente a los álcalis del cemento, gracias a su alto contenido en óxido de zirconio. Se utiliza este tipo de vidrio en el trabajo.
- **VIDRIO C: (vidrio químico).** - Vidrio álcali-cal con buena resistencia a la corrosión. Compuesto por óxido de boro.
- **VIDRIO A: (álcali-cal).** - A diferencia del vidrio tipo C, el vidrio A carece de óxido de boro.
- **VIDRIO D: (de alto desempeño dieléctrico).** - Vidrio con buenas propiedades eléctricas al ser un material dieléctrico. Compuesto por boro silicato.
- **VIDRIO E: (dieléctrico).** - Vidrio más comúnmente usado por sus características dieléctricas. Compuesto con aluminio boro silicato con menos de un 1% en peso de óxidos alcalinos.
- **VIDRIO ECR: (eléctrico y resistente químico).** - Vidrio con alta resistencia a los medios ácidos. Compuesto con silicato álcali-cal con menos de 1% en peso de óxidos alcalinos.
- **VIDRIO R: (de alto desempeño mecánico).** - Vidrio usado por sus características resistentes a la fatiga, a la temperatura y humedad. Compuesto con aluminosilicatos.
- **VIDRIO S: (de alta resistencia).** - Vidrio de gran resistencia mecánica.

Compuesto con aluminosilicatos con alto contenido de óxido de magnesio.

Para este estudio la selección para emplear fue fibra de vidrio tipo AR (Alkali Resistant), considerando las propiedades señaladas en la ficha técnica del material Ver Anexo VII.

Esta fibra presenta un diámetro de 13,5 μm , una densidad de 2,68 g/cm^3 , una resistencia a tracción entre 1620 MPa, y un módulo de Young de 74000 MPa.

Estas características describen un material con alta resistencia mecánica, buena rigidez y notable estabilidad química frente a los álcalis del cemento. Dichos aspectos fueron determinantes al momento de su elección, ya que contribuyen de forma directa al control de la retracción plástica.

Su diámetro fino facilita la distribución uniforme dentro de la mezcla, lo que mejora la cohesión del material y ayuda a reducir la aparición de microfisuras en las primeras horas de fraguado. Además, su módulo elástico elevado le permite resistir las tensiones internas generadas durante el proceso de endurecimiento.

2.5.3.5 Fibra de Vidrio AR

Fibratec V13 son filamentos de fibra de vidrio álcali resistentes (AR) de alto rendimiento con un contenido de zirconio superior al 17,1%. Gracias a su homogénea distribución y su geometría, consigue una perfecta cobertura para coser las microfisuras, a la vez que proporciona una muy eficaz distribución de las tensiones.

La continua generación de cristales de hidróxido de calcio a lo largo de los años como consecuencia continua de la hidratación del cemento, incrementa el refuerzo conseguido con las fibras, ya que estos cristales son los responsables del espectacular anclaje entre las fibras y el hormigón (Fibratec, 2024).

Geometría:



Número de filamentos/kg: > 200.000.000

Datos técnicos:

- Resistencia a tracción (σ_M): **1620 MPa**
- Límite elástico: **74000 MPa**
- Contenido de Zirconio: **> 17,1 %**
- Peso específico: **2,68 gr/cm³**
- Resistencia al álcali: **Inmune**
- Resistencia al ácido: **Alta**
- Punto de fusión: **> 1500 °C**
- Conductividad térmica: **Baja**
- Conductividad eléctrica: **Baja**



Aplicaciones:

Fibratec V13 puede ser usada en cualquier tipo de aplicación en la cual sea requerida una disminución de la fisuración causada por el efecto de la retracción plástica del hormigón, siendo especialmente interesante cuando buscamos un acabado final del hormigón o mortero de Nalta calidad y exento de la presencia de las fibras tradicionales (ejemplo: Pisos terminados con alisado mecánico, microcementos, etc.) (Fibratec, 2024)

Recomendaciones generales de mezclado:

- Las fibras deben ser introducidas en el mortero u hormigón en fresco directamente.
- Nunca hay que añadir las en el proceso de mezclado como primer componente.
- Asegure su perfecto mezclado y dispersión, ya sea en hormigonera o mediante mezcladora. Esta fibra se mezcla en pocos minutos (máximo 3 min)
- Cuando se añade en camión hormigonero, hágalo con una velocidad de 2 kg/min y permita que se mezcle otro minuto adicional tras añadir la totalidad de fibra (Fibratec, 2024).

2.5.4 Dosificación Fibra de Vidrio

La dosificación de fibra de vidrio en mezclas de hormigón debe realizarse cuidadosamente, considerando tanto el tipo de fibra como el volumen total de mezcla, la trabajabilidad deseada y el objetivo específico del refuerzo (control de fisuración temprana, aumento de tenacidad, mejora de durabilidad, etc.).

La dosificación de fibras de vidrio se puede expresar de dos maneras: como masa por unidad de volumen de hormigón entre 0,40 y 1,00 kg/m³ en peso.(Fibratec, 2024).

Los resultados permitirán determinar cuál dosificación ofrece el mejor equilibrio entre control de fisuración, comportamiento mecánico y viabilidad constructiva, en combinación con agregados provenientes de tres bancos distintos del departamento de Tarija.

2.6 Hormigón

El hormigón es, sin lugar a dudas, uno de los materiales más utilizados en la ingeniería civil a nivel mundial, debido a su versatilidad, durabilidad y resistencia. Se

define como un material compuesto resultante de la mezcla de cemento, agregados (arena y grava), agua y, en ocasiones, aditivos o adiciones, en proporciones determinadas que, al fraguar y endurecer, desarrolla propiedades mecánicas que le permiten soportar diversas solicitaciones (Silva Calfueque, 2007).

Hormigón es el material que resulta de la mezcla de cemento, grava, arena, agua, eventualmente aditivos y adiciones en proporciones adecuadas que, al fraguar y endurecer, adquiere resistencia.

En su estado fresco, el hormigón debe presentar una consistencia plástica adecuada que permita su fácil colocación, moldeo y compactación. Posteriormente, al combinarse el cemento con el agua, se inicia un proceso químico denominado hidratación, el cual produce un endurecimiento progresivo del material. Este proceso puede extenderse durante un periodo prolongado si se mantienen condiciones favorables de humedad y temperatura, lo que se traduce en una mejora gradual de su resistencia mecánica.

Una de las propiedades más destacadas del hormigón es su alta resistencia a la compresión, la cual es posible predefinir mediante una adecuada selección y dosificación de sus materiales constituyentes. En cambio, su resistencia a la tracción es baja, por lo que generalmente se refuerza con acero para permitir que la estructura pueda resistir también esfuerzos de flexión, tracción y corte. Esto da lugar al hormigón armado, ampliamente utilizado en edificaciones, infraestructuras viales, puentes, túneles, presas y grandes estructuras.

Además de su resistencia, el hormigón presenta otras características que justifican su amplio uso en obras civiles:

Otras de las características que han hecho del hormigón un material ampliamente utilizado en la construcción de diversas obras de ingeniería son:

- Facilidad de producción utilizando materiales de amplia difusión en cualquier país del mundo.
- Facilidad para conferir cualquier forma, gracias a la plasticidad que posee este en su etapa inicial.
- Posibilidad de prever y adaptar sus características a cualquier tipo de exigencia.

- Posibilidad de construcción utilizando recursos simples o complejos según la naturaleza de la obra.
- Buena durabilidad y resistencia a la corrosión, a condiciones ambientales desfavorables y al fuego.

En este estudio, se empleará hormigón H-25, es decir, una mezcla con resistencia característica a compresión de 250 kg/cm² a los 28 días, utilizada frecuentemente en elementos estructurales como losas. Esta mezcla será modificada con la incorporación de fibras de vidrio como refuerzo interno, con el objetivo de reducir la fisuración por retracción plástica y mejorar el comportamiento del material en sus primeras edades.

2.7 Hormigón Convencional

El hormigón convencional es la mezcla más utilizada en la construcción, compuesto por cemento, agregados (arena y grava o gravilla), agua y, en algunos casos, aditivos químicos. Su correcta dosificación y mezcla permiten obtener un material que, al fraguar y endurecer, desarrolla propiedades mecánicas capaces de soportar diversas solicitaciones estructurales.

Su uso es generalizado gracias a su resistencia, durabilidad, trabajabilidad y economía, siendo adecuado para elementos como cimientos, zapatas, columnas, muros, losas, pavimentos, vigas y otras estructuras de edificaciones y obras civiles.

Como componente del hormigón convencional el agua representa aproximadamente entre el 10 y el 25% del volumen del hormigón recién mezclado, dependiendo del tamaño máximo del agregado que se utilice.

El proceso de fabricación del hormigón convencional requiere la selección de materiales de calidad, control de la relación agua/cemento, ajuste de la granulometría de los agregados y consideración de las condiciones ambientales durante la colocación y curado. La resistencia final del hormigón dependerá directamente de la calidad de los materiales, la dosificación, la compactación y el curado adecuado (Silva Calfueque, 2007).

Ventajas del hormigón convencional:

- Permite un estricto control de calidad de los materiales y del producto final

mediante normas técnicas y procedimientos modernos.

- Su producción puede realizarse en plantas dosificadoras computarizadas, asegurando precisión en la mezcla y uniformidad del hormigón.
- Puede transportarse en estado fresco hacia la obra, lo que garantiza homogeneidad y eficiencia en la ejecución.
- Es compatible con una amplia gama de aditivos y adiciones, que permiten optimizar el tiempo de fraguado, la resistencia final y la durabilidad frente a condiciones ambientales adversas.
- Representa una solución versátil y económica, adaptable tanto a obras sencillas como a proyectos estructurales complejos.

2.8 Materiales Componentes del Hormigón

El hormigón es un material compuesto que resulta de la combinación de cemento, áridos, agua y, en algunos casos, aditivos o adiciones. La calidad y desempeño del material dependen directamente de las características de cada componente y de las proporciones utilizadas en la mezcla

- a) Cemento.** - Desde el punto de vista de la construcción, los cementos son materiales artificiales de naturaleza inorgánica y mineral que se presentan en forma de polvos muy finísimos generalmente de color gris que, mezclados con el agua forman pastas que fraguan y endurecen tanto bajo el agua como al aire a causa de las reacciones químicas que se producen. Al cemento, por necesitar agua para su fraguado se lo define como aglomerante hidráulico.

Clasificación. - De acuerdo con la norma boliviana NB 011-95 “Cemento - Definiciones, clasificación y especificaciones” los cementos fabricados en Bolivia se clasifican en:

- ✓ Cementos Pórtland
- ✓ Cementos Pórtland, tipo I
- ✓ Cementos Pórtland con puzolanda, tipo IP
- ✓ Cementos Pórtland con filler calizo, tipo IF
- ✓ Cementos puzolánicos, tipo P

Otra propiedad importante es el peso específico o densidad que es la relación entre la masa de una cantidad dada y el volumen absoluto que ocupa en esa masa. El método generalmente usado para su determinación es el de Le Chatelier. Para el cemento Pórtland su valor varía entre 3.10 y 3.15 y en los cementos con adiciones entre 2.9 y 3.0 gr/cm³. El procedimiento para la determinación de este valor esta descrito en la NB 064 “Cemento Método para determinar la densidad”

- El Cemento Portland es el más utilizado, y puede incluir adiciones que mejoren durabilidad, resistencia química o propiedades específicas según el tipo de estructura.

b) Áridos. - El agregado es un material granular compuesto de partículas generalmente de origen pétreo de diferentes tamaños y que unidos por medio de la pasta de cemento conforman la masa del concreto.

Su objetivo es constituir un esqueleto granular para el hormigón.

En términos generales los agregados ocupan aproximadamente el 60 a 80% del volumen total del concreto, por lo tanto, su calidad es muy importante desde el punto de vista de su:

- ✓ Economía
- ✓ Resistencia
- ✓ Durabilidad
- ✓ Trabajabilidad

- Se clasifican en finos (arena) y gruesos (grava, ripio), y su selección adecuada afecta la trabajabilidad, densidad y resistencia mecánica.
- La granulometría y forma de las partículas influye en la compactación, cohesión y reducción de vacíos de la mezcla.
- La limpieza y estabilidad química de los áridos es fundamental para evitar reacciones indeseadas con el cemento o disminución de durabilidad.

c) Agua. - El agua, además de utilizarse para el mezclado en la elaboración del hormigón, se usa también para el curado del hormigón y el lavado de los áridos.

El agua de mezclado cumple dos funciones: hidratar el cemento y otorgar la trabajabilidad necesaria al hormigón fresco por medio de la lubricación de los agregados.

El agua utilizada en el proceso de curado tiene por objetivo completar la hidratación del cemento después de completado el proceso de fraguado durante las primeras etapas de endurecimiento.

El agua utilizada para el lavado de los áridos tiene por objetivo el proporcionar esté material libre de impurezas y lo más limpio posible con el fin de mejorar la adherencia entre el árido y la pasta de cemento, y evitar la presencia de elementos que puedan afectar la durabilidad del hormigón (Velásquez Garzón, 2000).

- La cantidad de agua determina la relación agua/cemento (a/c), la cual influye directamente en la resistencia final, porosidad y durabilidad del hormigón.
- Debe ser potable y libre de sustancias que puedan interferir con la hidratación, provocar eflorescencias o reducir la resistencia mecánica.
- Generalmente representa entre el 10 % y 25 % del volumen total de la mezcla, dependiendo de las características de los áridos y del tipo de hormigón deseado.

2.9 Hormigón de Resistencia 250 kg/m²

El hormigón de 250 kg/m² corresponde a una mezcla diseñada para alcanzar una resistencia característica a la compresión de 250 kg/m² a los 28 días de curado.

La resistencia del hormigón se refiere a la capacidad del material para resistir esfuerzos de compresión sin fallar. Según la (Norma Boliviana CBH-87, 1987) la resistencia a compresión se determina mediante ensayos de rotura por compresión en probetas normalizadas, realizadas sobre amasadas de hormigón conservadas y ensayadas conforme a las normas NB/UNE 7240 y NB/UNE 7242. Para una amasada dada, se considera que la resistencia característica es aquella que se alcanza con una probabilidad del 95% de que no se obtengan valores inferiores en el 95% de las amasadas. Esta definición se basa en un nivel de confianza del 95%, equivalente a admitir un porcentaje de amasadas defectuosas del 5%

2.9.1 Clasificación de Resistencias del Hormigón

La CBH-87 clasifica el hormigón según su resistencia característica a la compresión (f_{ck}) en diferentes clases, denominadas H-12.5, H-15, H-20, H-25, H-30, H-35, H-40, H-45, H-50, H-55, H-60, H-65, H-70, H-75, H-80, H-85 y H-90. Cada clase corresponde a una resistencia mínima a la compresión a los 28 días de curado, expresada en megapascals (MPa). Por ejemplo, el hormigón H-25 tiene una resistencia característica de 25 MPa a los 28 días (Norma Boliviana CBH-87, 1987).

Los tipos H12,5 a H25, se emplean, generalmente, en estructuras de edificación, y los restantes de la serie encuentran su principal aplicación en obras importantes de ingeniería y en prefabricación.

Según otros autores, el hormigón se clasifica por su resistencia en:

- Hormigones de resistencia normal $140 \text{ kg/cm}^2 - 350 \text{ kg/cm}^2$.
- Hormigones de alta resistencia $350 \text{ kg/cm}^2 - 1000 \text{ kg/cm}^2$.
- Hormigones de ultra alta resistencia $1000 \text{ kg/cm}^2 - \text{Superiores}$

Según su masa específica CBH-87 en:

- Hormigón liviano o ligero $1200 - 2000 \text{ kg/m}^3$
- Hormigón de peso normal $2000 - 2800 \text{ kg/m}^3$
- Hormigón pesado $> 2800 \text{ kg/m}^3$

Según otros autores:

- Hormigón liviano o ligero $< 2000 \text{ kg/m}^3$
- Hormigón de peso normal $2000 - 2600 \text{ kg/m}^3$
- Hormigón pesado $> 2600 \text{ kg/m}^3$

Según (Velásquez Garzón, 2000).

2.9.2 Aplicaciones del Hormigón 250 kg/m^2

El hormigón 250 kg/m^2 es comúnmente utilizado en estructuras de edificación que no están sometidas a cargas excesivas o condiciones ambientales severas. Su resistencia es adecuada para elementos como:

- **Cimentaciones:** Proporcionan una base sólida y uniforme para edificaciones residenciales y comerciales ligeras.

- **Losas de entepiso y cobertura:** Superficies horizontales que soportan cargas moderadas y sirven como pisos intermedios o techos.
- **Soleras:** Pisos de concreto que distribuyen cargas de manera uniforme en naves industriales, talleres o almacenes de tránsito moderado.
- **Pavimentos urbanos, aceras y veredas:** Superficies de tránsito vehicular o peatonal, que requieren durabilidad y resistencia moderada.
- **Muros de contención de baja altura:** Estructuras que retienen tierra o material de relleno en jardines, patios o áreas urbanas.
- **Escaleras y rampas de hormigón:** Elementos estructurales o funcionales para circulación de personas en edificaciones o espacios públicos.
- **Elementos prefabricados no estructurales:** Paneles, bancas, jardineras, ductos y registros urbanos que facilitan la construcción rápida y estandarizada.
- **Canales de drenaje y zanjas revestidas:** Conductos para evacuación de aguas pluviales, controlando erosión y filtraciones.
- **Pavimentos de parques, plazas y áreas deportivas recreativas:** Superficies resistentes a tránsito moderado y a las condiciones ambientales.
- **Anclajes y bases para columnas, barandas y estructuras metálicas ligeras:** Permiten fijar elementos secundarios de la edificación o equipamiento urbano.
- **Cubiertas de techos planos y terrazas:** Losas superiores que soportan cargas propias, equipos ligeros o tránsito limitado.
- **Muros divisorios no portantes:** Elementos que delimitan espacios sin soportar cargas estructurales significativas.
- **Pequeñas obras hidráulicas:** Alcantarillas, pasos de agua y cámaras de inspección que requieren durabilidad frente al agua y tránsito moderado.
- **Infraestructura educativa o sanitaria de bajo tránsito:** Pisos, rampas y patios de escuelas, consultorios y centros comunitarios.

2.10 Propiedades del Hormigón Fresco

El estudio de las propiedades del concreto fresco resulta de considerable importancia porque influyen considerablemente en las propiedades del hormigón endurecido y en la calidad como producto terminado.

El grado de humedad que pueda tener el hormigón en estado fresco resulta fundamental para que el concreto pueda ser transportado, compactado por los medios apropiados con el mínimo posible de energía, y tenga cohesión suficiente, no se produzca segregación o exudación

2.10.1 Trabajabilidad

La trabajabilidad se define como el grado de facilidad o dificultad con que el concreto puede ser mezclado, manejado, transportado, colocado y terminado sin que pierda su homogeneidad.

La trabajabilidad puede considerarse como una combinación de las siguientes propiedades:

- **La consistencia.** - Se refiere al estado de fluidez, o sea, al grado de humedad de la mezcla, o, dicho en otras palabras, que tan seca o fluida es una mezcla de concreto.
- **La cohesividad.** - Es la resistencia de una mezcla de concreto a la segregación y/o exudación.
- **La plasticidad.** - Es la propiedad del concreto que le permite ser fácilmente moldeado, y que a la vez cambiar de forma lentamente si se saca del molde en estado fresco.
- **La movilidad.** - Es la facilidad con la que el concreto puede fluir alrededor del acero de refuerzo, dentro de las formaletas, etc.
- **La compactibilidad.** - Se refiere a la facilidad con la que el aire atrapado en la mezcla puede ser expulsado (Velásquez Garzón, 2000).

Consistencia

La consistencia del hormigón será la necesaria para que, con los métodos de puesta en obra y compactación previstos, el hormigón pueda rodear las armaduras en forma continua y rellenar completamente los encofrados sin que se produzcan coqueas. La

determinación de la consistencia del hormigón se realizará utilizando el método del ensayo descrito en la norma NB/UNE 7103.

Como norma general y salvo justificación especial, no se utilizan hormigones de consistencia fluida, recomendándose los de consistencia plástica, compactados por vibrado. En elementos con función resistente, se prohíbe la utilización de hormigones de consistencia líquida. Se exceptúa de lo anterior el caso de hormigones fluidificados por medio de un súper plastificante. La fabricación y puesta en obra de estos hormigones, deberá realizarse según reglas específicas.

Las distintas consistencias y los valores límites de los asentamientos correspondientes, medidos en el cono de Abrams de acuerdo con el método del ensayo indicando en la norma

NB/UNE 7103, son los siguientes: Según (Norma Boliviana CBH-87, 1987).

Tabla 2.4

Clasificación del hormigón según su consistencia (ensayo de asentamiento con cono de Abrams)

Consistencia	Asentamiento (cm)	Tolerancia, en cm
Seca	0 – 2	0
Plástica	3 – 5	±1
Blanda	6 – 9	±1
Fluida	10 – 15	±2

Fuente: CBH-87

2.10.2 Docilidad

Es sinónimo de trabajabilidad del hormigón fresco. Es su capacidad de ser puesto en su lugar de destino con los medios de compactación de que se dispone. Principalmente se mide mediante el descenso en centímetros en el ensayo del cono de Abrams.

2.10.3 Homogeneidad

Es la cualidad de distribución por toda la masa de todos los componentes del hormigón en las mismas proporciones. A la cualidad de homogeneidad se opone el

defecto de la segregación o decantación. Se mide por la masa específica de porciones de hormigón fresco separadas entre sí.

2.10.4 *Peso específico:*

Es la relación entre la masa del hormigón fresco y el volumen ocupado. Puede medirse con el hormigón compactado o sin compactar. La densidad del hormigón fresco compactado es una medida del grado de eficacia del método de compactación empleado.

2.10.5 *Tiempo Abierto:*

Es el período de tiempo que transcurre entre el amasado del hormigón y el principio del fraguado. Es una propiedad muy importante pues es en el que se puede manipular el hormigón sin merma de sus características (Escuela de Ingeniería Técnica Civil, Arquitectura Técnica, 2007).

2.11 Propiedades del Hormigón Endurecido

El hormigón debido a un proceso físico-químico de larga duración experimenta un proceso de endurecimiento transformándose de plástico en sólido.

En esta etapa el hormigón adquiere nuevas propiedades que son función del tiempo y que dependen de:

- Los materiales componentes (características y propiedades)
- Condiciones ambientales a las que estará expuesta.

Las propiedades se determinan mediante ensayos (no se pueden deducir a partir de las características del proceso de endurecimiento) (Velásquez Garzón, 2000).

2.11.1 *La Densidad*

Es la relación de la masa del hormigón y el volumen ocupado. Para un hormigón bien compactado de áridos normales oscila entre 2300- 2500 kg/m³. En caso de utilizarse áridos ligeros la densidad oscila entre 1000-1300 kg/m³. Y en caso de utilizarse áridos pesado la densidad oscila entre 3000-3500 kg/m³.

2.11.2 *Compacidad*

Es la cualidad de tener la máxima densidad que los materiales empleados permiten. Un hormigón de alta compacidad es la mejor protección contra el acceso de sustancias perjudiciales.

2.11.3 Permeabilidad

Es el grado en que un hormigón es accesible a los líquidos o a los gases.

El factor que más influye en esta propiedad es la relación entre la cantidad de agua añadida y de cemento en el hormigón (a/c). Cuanto mayor es esta relación mayor es la permeabilidad y por tanto más expuesto el hormigón a potenciales agresiones.

2.11.4 Dureza

Es una propiedad superficial que en el hormigón se modifica con el paso del tiempo debido al fenómeno de carbonatación. Un método de medirla es con el índice de rebote que proporciona el esclerómetro Smichtd. (Escuela de Ingeniería Técnica Civil, Arquitectura Técnica, 2007).

2.11.5 Peso Específico

O masa específica según CBH-87, se define como el peso por unidad de volumen.

El peso específico del hormigón endurecido depende de los pesos específicos y proporciones de sus materiales constituyentes.

- Para hormigones normales su valor oscila entre 2350 a 2550 kg/m³.
- Según CBH-87 la masa específica del hormigón sin armar se estima en 23 kg/m³ y del hormigón armado con cuantías normales en 25 kg/m³

El peso específico del hormigón varía con el tiempo debido a la evaporación del agua de amasado hacia la atmósfera, en algunos casos el peso específico puede variar hasta en un 7% con respecto a su peso específico inicial.

El peso específico está relacionado con otras propiedades como ser la resistencia, el aislamiento térmico y acústica, etc.

El peso específico se puede determinar conforme a los procedimientos de la norma ASTM C 642.

2.11.6 Resistencia

La resistencia del hormigón es la habilidad que posee para resistir esfuerzos (compresión, tracción, flexión, corte y torsión), siendo el más importante el de compresión.

Los hormigones más resistentes suelen ser más densos, menos permeables, más resistentes a los agentes climáticos y agentes destructivos, pero también tienen el inconveniente de presentar mayor contracción por el fraguado y menos extensibilidad, por lo tanto, son más propensos al agrietamiento (Velásquez Garzón, 2000).

La resistencia del hormigón depende de las características físicas y químicas de sus componentes y de las interacciones entre ellos.

La resistencia del hormigón depende de los siguientes factores:

- **Resistencia de la pasta endurecida;** que se incrementa con el incremento del grado de hidratación
- **Resistencia de los agregados;** parte de la resistencia es absorbida por ellos.
- **Adherencia entre pasta y agregados;** se constituye quizás en el elemento más débil de la masa endurecida (la zona de contacto se llama interface “agregado matriz”).

Los factores que inciden en la resistencia del hormigón son:

- Tipo y cantidad de cemento
- Relación agua/cemento (a/c)
- Características de los agregados
- Agua
- Fraguado
- Curado
- Edad del concreto

2.12 Características Mecánicas del Hormigón

2.12.1 Resistencia a la Compresión

En términos generales, la gran mayoría de estructuras de concreto son diseñadas bajo la suposición de que este resiste únicamente esfuerzos de compresión, por consiguiente, para propósitos de diseño estructural, la resistencia a la compresión es el criterio de calidad, y de allí que los esfuerzos de trabajo estén prescritos por los códigos en términos de porcentajes de la resistencia a la compresión (Niño Hernández, 2010).

La medida de la resistencia a la compresión se efectúa por medio de pruebas estandarizadas.

Las pruebas de resistencia del concreto endurecido se pueden ejecutar en especímenes curados moldeados de muestras de concreto fresco según las normas ASTM C 31

El valor de la resistencia, obtenida en el ensayo, depende de los siguientes factores:

- Forma y dimensiones de la probeta utilizada; éstas pueden ser cilíndricas de (15 cm) de diámetro por (30cm) de altura, o cúbicas de (20 cm) de arista (Velásquez Garzón, 2000).

2.12.2 Resistencia a Tracción por Flexión

La resistencia a la flexión es una medida de la resistencia a la tracción del concreto (hormigón). Es una medida de la resistencia a la falla por momento de una viga o losa de concreto no reforzada. Se mide mediante la aplicación de cargas a vigas de concreto de (150 x 150 mm) de sección transversal y con luz de como mínimo tres veces el espesor. La resistencia a la flexión se expresa como el Módulo de Rotura (MR) (MPa) y es determinada mediante los métodos de ensayo ASTM C78 (cargada en los puntos tercios) o ASTM C293 (cargada en el punto medio).

El Módulo de Rotura es cerca del 10% al 20% de la resistencia a compresión, en dependencia del tipo, dimensiones y volumen del agregado grueso utilizado, sin embargo, la mejor correlación para los materiales específicos es obtenida mediante ensayos de laboratorio para los materiales dados y el diseño de la mezcla. El Módulo de Rotura determinado por la viga cargada en los puntos tercios es más bajo que el módulo de rotura determinado por la viga cargada en el punto medio, en algunas ocasiones tanto como en un 15% (National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA), 2020).

2.13 Materiales que Intervienen en el Estudio

Para la ejecución del estudio comparativo del índice de fisuración por retracción plástica según ASTM C1579, se requiere una caracterización completa y precisa de los materiales que conforman el hormigón 250 kg/cm²: cemento, agregados, agua, fibra de

refuerzo (vidrio). Cada uno será evaluado mediante ensayos estandarizados que aseguren la homogeneidad, calidad y las mezclas empleadas en las losas de ensayo.

2.14 Análisis de los Áridos

2.14.1 Antecedentes

Los agregados son el mayor constituyente del concreto, generalmente componen más del 70% del material en un metro cúbico de concreto y son los que hacen que este sea un material económico de construcción. En la elaboración de concreto de masa normal, usado en la mayoría de construcciones, los agregados frecuentemente son obtenidos de arenas naturales y depósitos de grava. La fuente de materiales debe estar localizada a una distancia razonable del sitio de trabajo y para su selección hay que tener presente que sus propiedades difieren considerablemente de una a otra. Cada una puede variar en la mineralogía de sus componentes o las condiciones físicas de sus partículas, tales como, la distribución de tamaños, la forma y la textura. Todos estos factores tienen un efecto en el comportamiento del concreto. Los agregados son cualquier sustancia sólida o partículas añadidas intencionalmente al concreto que ocupan un espacio rodeado por pasta de cemento, de tal forma, que en combinación con esta proporcionan resistencia mecánica, al mortero o concreto en estado endurecido y controlan los cambios volumétricos que normalmente tienen lugar durante el fraguado del cemento, así como los que se producen por las variaciones en el contenido de humedad de las estructuras.

La calidad de los agregados está determinada por el origen, por su distribución granulométrica, densidad, forma y superficie. Se han clasificado en agregado grueso y agregado fino, fijando un valor en tamaño de 4,76 mm a 0,075 mm para el fino o arena y de 4,76 mm en adelante para el grueso. Frecuentemente, la fracción de agregado grueso es subdividida dentro de rangos, tales como, 4,76 mm a 19 mm para la gravilla y de 19 mm a 51 mm para la grava. La selección del tamaño de agregado grueso para un concreto reforzado está en función del tipo de estructura y separación de la armadura (Niño Hernández, 2010).

En este estudio se analizarán áridos provenientes de tres bancos de préstamo ubicados en distintas zonas de la ciudad de Tarija, con el objetivo de determinar su

efecto sobre el comportamiento del hormigón H-25 reforzado con fibra de vidrio frente a la fisuración por retracción plástica. Este análisis permitirá seleccionar la fuente de árido más adecuada en función del desempeño estructural esperado.

2.14.2 Clasificación Según su Procedencia

Pueden ser naturales o artificiales. Los agregados naturales se obtienen de la explotación de depósitos de arrastres fluviales (arenas y gravas de río), o glaciares (cantos rodados) y de canteras de diversas rocas y piedras naturales. Los agregados artificiales son los que se obtienen a partir de procesos industriales, tales como, arcillas expandidas, escorias de alto horno, Clinker y limaduras de hierro, entre otros.

2.14.3 Clasificación Según su Tamaño

La forma más empleada para clasificar los agregados naturales es según su tamaño, el cual varía desde fracciones de milímetros hasta varios centímetros en sección transversal. La distribución de tamaños se conoce con el nombre de granulometría.

La clasificación más general del agregado para elaborar concreto según su tamaño se muestra en la tabla 2.6 donde se indican los nombres más comunes.

Tabla 2.5

Clasificación de agregados según el tamaño

Tamaño de las partículas en mm (Tamiz)	Denominación corriente	Clasificación como agregado para concreto
< 0,002	Arcilla	Fracción muy fina
0,002 – 0,074 (No.200)	Limo	Fracción muy fina
0,075 – 4,76 (N°.200 – N°.4)	Arena	Agregado fino
4,76 – 19,1 (N°.4 – 3/4")	Gravilla	Agregado grueso
19,1 – 50,8 (3/4" – 2")	Grava	Agregado grueso
50,8 – 152,4 (2" – 6")	Piedra	Agregado grueso
> 152,4 (6")	Rajón / Piedra bola	Agregado grueso

Fuente: Niño Hernández, (2010). Tecnología del concreto: materiales, propiedades y mezclas

2.15 Propiedades Físicas de los Agregados

2.15.1 Forma y Textura

Forma. –La forma de los agregados se refiere a la geometría de sus partículas, que puede ser redondeada, aplanada, cúbica o alargada. Esta característica influye en la trabajabilidad del concreto fresco y en la resistencia del concreto endurecido. Los

agregados angulosos y con cantos vivos proporcionan una mejor adherencia con la pasta de cemento, aumentando la resistencia mecánica, aunque pueden dificultar la colocación y compactación del concreto.

Tabla 2.6

Clasificación de los agregados según su forma

Clasificación	Descripción	Ejemplos
Redondeada	Completamente desgastadas por el agua o totalmente formadas por fricción.	Grava de río o de playa; arena del desierto, de playa o acarreadas por el viento.
Irregular	Irregulares por naturaleza, parcialmente formadas por fricción o con bordes redondeados.	Otras gravas; pizarra de superficie o subterránea.
Escamosa	Materiales cuyo espesor es pequeño en comparación con sus otras dos dimensiones.	Roca laminada.
Angular	Con bordes bien definidos, formados en las intersecciones de caras aproximadamente planas.	Rocas trituradas de todos tipos, taludes detríticos y escoria triturada.
Alargada	Material que suele ser angular, pero cuya longitud es bastante mayor que las otras dos dimensiones.	-
Escamosa y alargada	Material cuya longitud es bastante mayor que el ancho y el ancho bastante mayor que el espesor.	-

Fuente: Neville, A. M. (1999). Propiedades del concreto.

Textura. – La textura superficial se relaciona con la rugosidad, porosidad y características microscópicas de la superficie de los agregados. Esta propiedad afecta directamente la adherencia con la pasta de cemento, la cantidad de agua necesaria para la trabajabilidad y la resistencia final del concreto. Las superficies lisas ofrecen menor adherencia, mientras que las rugosas, porosas o cristalinas favorecen una unión más fuerte y un mejor comportamiento estructural.

Tabla 2.7*Clasificación de los agregados según su textura superficial*

Grupo	Textura superficial	Características	Ejemplos
1	Vítrea	Fractura de concha	Pedernal negro, escoria vítrea
2	Lisa	Desgastada por el agua o lisa debido a fractura de roca laminada o de roca de grano fino	Grava, horsteno, pizarra, mármol, algunas riolitas
3	Granular	Fracturas que muestran granos más o menos redondeados en forma uniforme	Arenisca, oolita
4	Áspera	Fractura áspera de roca de granos finos o medianos, que contengan partes cristalinas difíciles de detectar	Basalto, felsita, pórfido, caliza
5	Cristalina	Con partes cristalinas fáciles de detectar	Granito, gabro, gneis
6	En forma de panal	Con vacíos y poros visibles	Ladrillo, piedra pómez, escoria espumosa, clinker, arcilla expandida

Fuente: Neville, A. M. (1999). Propiedades del concreto.

2.15.2 Ensayos Realizados a los Áridos Para la Dosificación**2.15.2.1 Granulometría**

La granulometría es la distribución del tamaño de las partículas que constituyen un agregado, y es un parámetro fundamental para garantizar la calidad y durabilidad del concreto. Según la ASTM C33/C33M-08, los agregados finos y gruesos deben cumplir con límites específicos de gradación que aseguren la trabajabilidad, cohesión y resistencia del concreto.

El análisis granulométrico se realiza mediante tamizado utilizando tamices de malla de alambre con aberturas cuadradas, determinando el porcentaje de material retenido en cada tamiz. La norma indica que no es necesario que la curva granulométrica siga un perfil ideal; sin embargo, debe encontrarse dentro de los límites establecidos para cada tipo de agregado, garantizando así un comportamiento adecuado en la mezcla de concreto.

En resumen, la granulometría, definida por la (ASTM C33/C33M-08 International, 2008), asegura que los agregados empleados en el concreto tengan una distribución de partículas adecuada para obtener un material homogéneo, resistente y durable.

2.15.2.2 Cuarteo de Muestras de Agregado con Cuarteador Metálico

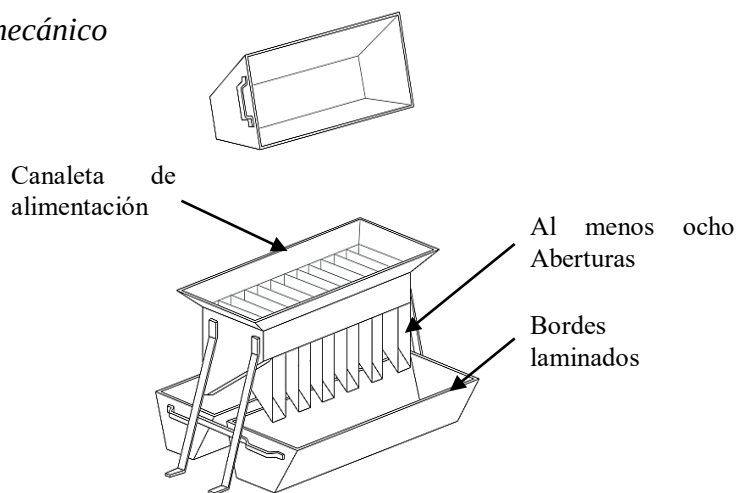
Para garantizar que las muestras de agregado utilizadas en los ensayos fueran representativas y homogéneas, se empleó el cuarteador metálico, siguiendo las normas (ASTM C702, 2011) / (AASHTO T248, 2014) Este método permite reducir la cantidad de material de forma rápida y confiable, evitando sesgos por segregación de tamaños.

Procedimiento

- A. Colocar la muestra total en la tolva y distribuirla uniformemente de un borde a otro, de manera que cuando pase por las canaletas, fluyan cantidades aproximadamente iguales por las mismas (Figura 2.11).
- B. Introducir la muestra a una velocidad tal que permita que fluya libremente a través de las canaletas y hacia los receptáculos inferiores. Con lo anterior, se obtendrá la primera división de la muestra.
- C. Retirar el material de uno de los receptáculos y reservar. Esta porción de material se puede utilizar posteriormente para realizar reducciones para otros ensayos, cuando sea necesario.
- D. Reintroducir el material del otro receptáculo nuevamente en la tolva (repetir puntos A a B). Con lo anterior, se obtendrá una segunda división de la muestra.
- E. Repetir el procedimiento (puntos A a D) cuantas veces sea necesario, hasta obtener el tamaño de muestra requerido por el ensayo en uno de los receptáculos. (Instituto Mexicano del Transporte (IMT), 2019).

Figura 2.11

Separador mecánico





Fuente: Método de cuarteo de muestras de agregado según ASTM C702/C702M-24.

2.15.2.3 Agregado Grueso (grava):

El **agregado grueso** está compuesto por partículas minerales **retenidas en el tamiz N° 4 (4,75 mm)** y puede consistir en **grava natural** o **piedra triturada**. Su tamaño máximo nominal más común varía entre **19 mm, 25 mm y 38 mm**, dependiendo del tipo de elemento estructural y el espesor del hormigón.

El agregado grueso cumple un papel fundamental en la mezcla de hormigón:

- **Aportar resistencia y rigidez estructural:** Actúa como esqueleto del concreto, soportando cargas de compresión y aumentando el módulo de elasticidad.
- **Mejorar la estabilidad dimensional:** Controla retracciones, fluencias y fisuración del concreto.
- **Optimizar compacidad y durabilidad:** Una distribución granulométrica continua disminuye vacíos y porosidad, aumentando la impermeabilidad y vida útil del concreto.
- **Reducir consumo de cemento y costos:** Al ocupar mayor volumen, disminuye la cantidad de pasta de cemento necesaria para rellenar vacíos, mejorando eficiencia económica.

- **Tamaño máximo (TM)**

Se define como la abertura del menor tamiz por el cual pasa el 100% de la muestra.

- **Tamaño Máximo Nominal (TMN)**

El tamaño máximo nominal es otro parámetro que se deriva del análisis granulométrico y está definido como el siguiente tamiz que le sigue en abertura (mayor) a aquel cuyo porcentaje retenido acumulado es del 15% o más.

- **Módulo de Finura (MF)**

El módulo de finura es un parámetro que se obtiene de la suma de los porcentajes retenidos acumulados de la serie de tamices especificados que cumplan con la relación 1:2 desde el tamiz # 100 en adelante hasta el tamaño máximo presente y dividido en 100.

Tabla 2.8

Requisitos de Granulometría para Agregados Gruesos

N° de Tamaño	Tamaño nominal (Tamices con aberturas cuadradas)	Porcentajes en masa que pasan cada tamiz de laboratorio (Aberturas cuadradas)													
		100 mm (4 in.)	90 mm (3½ in.)	75 mm (3 in.)	63 mm (2½ in.)	50 mm (2 in.)	37,5 mm (1½ in.)	25,0 mm (1 in.)	19,0 mm (¾ in.)	12,5 mm (½ in.)	9,5 mm (¾ in.)	4,75 mm (Nº 4)	2,36 mm (Nº 8)	1,18 mm (Nº 16)	300 µm (Nº 50)
1	90 a 37,5 mm (3½ a 1½ in.)	100	90 a 100	...	25 a 60	...	0 a 15	...	0 a 5	...	...	...	...	...	...
2	63 a 37,5 mm (2½ a 1½ in.)	...	...	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	...	0 a 5	...	...	...	...	...	...
3	50 a 25,0 mm (2 a 1 in.)	...	...	...	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	...	0 a 5	...	...	...	...	...
357	50 a 4,75 mm (2 in. a Nº 4)	...	...	...	100	95 a 100	...	35 a 70	...	10 a 30	...	0 a 5	...	...	...
4	37,5 a 19,0 mm (1½ a ¾ in.)	...	...	...	...	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	...	0 a 5	...	...	...	...
467	37,5 a 4,75 mm (1½ in. a Nº 4)	...	...	...	...	100	95 a 100	...	35 a 70	...	10 a 30	0 a 5	...	...	...
5	25,0 a 12,5 mm (1 a ½ in.)	...	...	...	...	...	100	90 a 100	20 a 55	0 a 10	0 a 5	...	...	...	...
56	25,0 a 9,5 mm (1 a ¾ in.)	...	...	...	...	...	100	90 a 100	40 a 85	10 a 40	0 a 15	0 a 5	...	...	...
57	25,0 a 4,75 mm (1 in. a Nº 4)	...	...	...	...	...	100	95 a 100	...	25 a 60	...	0 a 10	0 a 5	...	...
6	19,0 a 9,5 mm (¾ a ¾ in.)	...	...	...	...	...	...	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	0 a 5	...	...	...
67	19,0 a 4,75 mm (¾ in. a Nº 4)	...	...	...	...	...	...	100	90 a 100	...	20 a 55	0 a 10	0 a 5	...	...
7	12,5 a 4,75 mm (½ in. a Nº 4)	...	...	...	...	...	...	...	100	90 a 100	40 a 70	0 a 15	0 a 5	...	...
8	9,5 a 2,36 mm (¾ in. a Nº 8)	...	...	...	...	...	...	...	...	100	85 a 100	10 a 30	0 a 10	0 a 5	...
89	9,5 a 1,18 mm (¾ in. a Nº 16)	...	...	...	...	...	...	...	...	100	90 a 100	20 a 55	5 a 30	0 a 10	0 a 5
9 ^A	4,75 a 1,18 mm (Nº 4 a Nº 16)	...	...	...	...	...	...	...	...	...	100	85 a 100	10 a 40	0 a 10	0 a 5

Fuente: ASTM International (2024). ASTM C33/C33M-24

Según la norma (ASTM C33/C33M-08 International, 2008), el agregado grueso debe cumplir criterios de gradación, resistencia a fragmentación (índice Los Ángeles), forma angular o rugosa, y ausencia de impurezas dañinas (ASTM International).

Ecuación módulo de finura

$$MF = \frac{\sum \%Ret(1\ 1/2" + 3/4" + 3/8" + N^{\circ}4 + 500)}{100}$$

Se considera que el MF de una grava adecuada para producir hormigón debe estar entre 5.5 y 8.5.

2.15.2.4 Agregado Fino

El agregado fino es el conjunto de partículas minerales que pasan completamente a través del tamiz N° 4 (4,75 mm) y quedan retenidas en el tamiz N° 200 (0,075 mm). Está compuesto principalmente por arenas naturales, manufacturadas o una combinación de ambas, y constituye un componente esencial del hormigón, ya que:

- **Llena los vacíos entre partículas de agregado grueso**, mejorando la cohesión de la mezcla.
- **Aumenta la trabajabilidad**, facilitando el transporte, colocación y compactación del concreto.
- **Reduce la segregación y exudación**, logrando un concreto más uniforme y duradero.

Especificaciones ASTM C33/C33M para agregados finos:

- **Gradación:** Debe encontrarse dentro de los límites de paso establecidos para cada tamiz, asegurando una distribución granulométrica adecuada.
- **Módulo de finura (FM):** Entre **2.3 y 3.1** para asegurar consistencia en la pasta de cemento.
- **Impurezas:** Máximo 3% de materiales orgánicos o arcillosos que puedan afectar la adherencia o durabilidad.
- **Durabilidad y reactividad:** Libre de partículas reactivas con los álcalis del cemento; resistencia a ciclos de sonoridad según ASTM.

Límites para Sustancias Perjudiciales en Agregado Fino para Concreto

La (ASTM C33/C33M-08 International, 2008) establece límites máximos para agregado fino, con el fin de garantizar la durabilidad, resistencia y apariencia del concreto. Estos límites se aplican al porcentaje en masa del total de la muestra.

Tabla 2.9

Límites de sustancias perjudiciales en agregado fino según ASTM C33/C33M-24

Ítem	Porcentaje máximo de la muestra (%)
Grumos de arcilla y partículas friables	3,0
Material más fino que el tamiz N° 200 (75 µm):	

Concreto sujeto a abrasión	3,0 ⁴
Todo otro concreto	5,0 ⁴
Carbón y lignito:	
Concreto donde la apariencia superficial es importante	0,5
Todo otro concreto	1,0

Fuente: ASTM C33/C33M

Nota 4: En el caso de arenas manufacturadas, si el material más fino que el tamiz N° 200 consiste en polvo de fractura esencialmente libre de arcilla o esquisto, estos límites pueden aumentarse a 5 % para concreto sujeto a abrasión y a 7 % para otro tipo de concreto.

Tabla 2.10

Gradación para agregado fino según ASTM C33/C33M-24

Tamiz (mm)	% que pasa (mínimo)	% que pasa (máximo)
9,5 (3/8")	100	100
4,75 (No. 4)	95	100
2,36 (No. 8)	80	100
1,18 (No. 16)	50	85
0,60 (No. 30)	25	60
0,30 (No. 50)	5	30
0,15 (No. 100)	0	10

Fuente: ASTM C33/C33M

Nota: Cuando la gradación del agregado fino se encuentra cerca de los valores mínimos para los tamices de 0,30 mm (No. 50) y 0,15 mm (No. 100), pueden presentarse dificultades en la trabajabilidad, bombeo del concreto o sangrado excesivo. Para corregir estas deficiencias, se pueden aplicar las siguientes soluciones:

Según la norma ASTM C33/C33M, el agregado fino debe cumplir criterios de gradación, módulo de finura (FM 2.3–3.1), ausencia de impurezas orgánicas y durabilidad frente a reactividad alcalina y sonoridad (ASTM International).

- **Ecuación módulo de finura**

$$MF = \frac{\sum \%Ret(3/8" + N^{\circ}4 + N^{\circ}8 + N^{\circ}16 + N^{\circ}30 + N^{\circ}50 + N^{\circ}100)}{100}$$

Se considera que el MF de una Arena adecuada para producir hormigón debe estar entre 2.3 y 3.1.

2.15.2.5 Análisis Granulométrico de los Agregados Grueso y Fino

Este método de ensayo abarca el procedimiento para la determinación de los tamaños de las partículas de agregado fino empleando tamices de aberturas cuadradas siendo también aplicables al empleo de cribas de laboratorio de aberturas circulares.

Equipo. -

1. Balanza sensible al 0.1 gramo
2. Juego de tamices
3. Horno de temperatura constante (105°C)
4. Brocha para limpiar los tamices
5. Vibrador mecánico para tamices

Preparación de la muestra. -

- La muestra debe ser representativa, la cual se obtiene por cuarteo
- El peso de la muestra de agregado fino necesario para el ensayo deberá ser de unos 500 gramos.
- El peso de la muestra de agregado grueso necesario para el ensayo deberá estar de acuerdo con el siguiente cuadro:

Tabla 2.11

Relación entre el tamaño máximo de las partículas y el peso mínimo de la muestra

Tamaño máximo de las partículas (pulgadas)	Peso mínimo de la muestra (g)
3/8	1,000
1/2	2,500
3/4	5,000
1	10,000
1 ½	15,000
2	20,000
2 ½	25,000
3	30,000
3 ½	35,000

Fuente: Lab. Hormigones y Resist. Mat. U.A.J.M.S.

Si se trata de una mezcla de grava y arena se deberá separar usando el tamiz No 4 y se analizará las partes separadamente.

Calculo. - El peso del material retenido sobre cada tamiz será anotado y expresado como sigue:

- Por ciento sobre cada tamiz
- Por ciento total que pasa

Cálculo de la masa retenida parcial por tamiz respecto a la masa total antes del cribado con aproximación de 0.1 % (1 decimal).

$$\text{Retenido parcial \%} = \frac{\text{Masa retenida en cada tamiz}}{A} \times 100$$

Cálculo del porcentaje de material que pasa por cada tamiz con aproximación de 0.1 % (1 decimal).

Material que pasa % = % que pasa el tamiz superior – % masa retenida parcial

Cálculo de la diferencia de masas de la muestra de agregado final (después del tamizado), respecto a la masa inicial de la muestra; con aproximación de 0.1 %. Si la diferencia de masas es mayor al 0.3 % o negativa, el ensayo deberá ser descartado (Instituto Mexicano del Transporte (IMT), 2019).

$$\text{Diferencia de masas \%} = \frac{(A - B)}{A} \times 100$$

2.15.2.6 Peso Específico y Absorción de Agua

Agregado grueso:

- Se toma una muestra de aproximadamente 5 kg mediante cuarteo todo material que pase del tamiz N° 4 será desechado.
- Se sumerge en agua durante 24 horas, se seca superficialmente (condición SSD), se pesa sumergida y seca al horno a temperatura const. (100–110 °C).

Se calculan:

- Peso específico seco
- Peso específico SSD
- Absorción de agua

El ensayo que a continuación se describe tiene por objeto la determinación del peso específico aparente y del peso específico a granel, lo mismo que la cantidad de agua expresada como porcentaje que absorbe el agregado grueso cuando se sumerge en agua por periodo de 24 horas.

Equipo. -

Una balanza que tenga 5 Kg de capacidad ó más y sensibilidad de 0.5 gr.

Cesto cilíndrico de tela metálica (la cesta deberá ser hecha de malla metálica No 4) de 20cm de diámetro y de 20 cm de altura.

Un recipiente en el que se pueda sumergir la cesta de alambre y un aparato para suspender la cesta cuando se sumerge, con el fin de obtener el peso de la muestra sumergida.

Procedimiento. -

Se lava el material a fin de remover el polvo o cualquier impureza que cubra la superficie de las partículas, luego se sumerge la muestra con agua por un periodo de 24 horas.

Se saca la muestra del agua y se secan las partículas con una toalla hasta que la película de agua haya desaparecido de la superficie. Se deberá evitar la evaporación durante esta operación.

Se obtiene después el peso de la muestra con sus partículas saturadas.

La muestra se vuelve a sumergir después de ser pesada y se determina el peso de la muestra así sumergida.

Se seca la muestra en un horno a temperatura constante (105 °C) y luego se deja enfriar y se pesa.

Muestra. - La muestra consiste aproximadamente de 5 Kg de material separado por el método de cuarteo y de manera que todo el material quede retenido sobre el tamiz de 3/8".

Cálculos.

$$\text{Peso específico a granel} = \frac{A}{B - C}$$

Siendo:

A= Peso de la muestra secada en horno, en gr.

B= Peso de la muestra saturada, pero con superficie seca, en gr.

C= Peso de la muestra saturada dentro del agua, en gr.

$$\text{Peso Específico en condición Saturado y superficie seca} = \frac{B}{B - C}$$

(-C) = Este término es la pérdida de peso de la muestra sumergida y significa por lo tanto el volumen de agua desplazado o sea el volumen de la muestra.

$$\text{Peso Específico Aparente} = \frac{A}{A - C}$$

$$\% \text{ de Absorción} = \frac{B - A}{A} \times 100$$

Agregado fino:

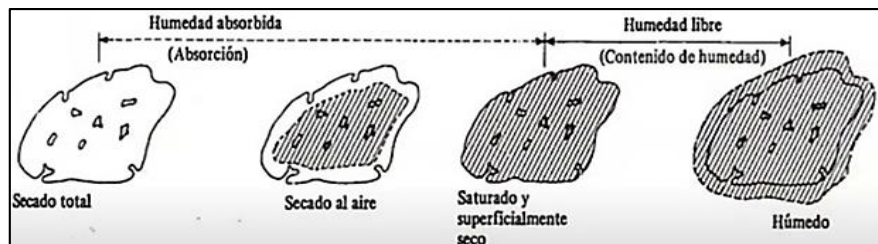
Las partículas de los agregados contienen poros que pueden estar conectados o no con la superficie.

Por aquellos poros o capilares que están interconectados con la superficie puede ingresar el agua, hasta saturar los mismos, para luego quedar retenida en la superficie de las partículas formando una película adherida a las mismas.

En la figura siguiente se esquematizan los estados de humedad que pueden presentar los agregados: (Universidad Argentina de la Empresa, 2018).

Figura 2.12

Representación diagramática de la humedad en el agregado



Fuente: Universidad Argentina de la Empresa, 2018.

El ensayo que se describe a continuación tiene por objeto la determinación del peso específico aparente y del peso específico a granel, lo mismo que la cantidad de agua

que absorbe el agregado fino cuando se sumerge en agua por un periodo de 24 horas, expresada como un porcentaje en peso.

Equipo. -

- Balanza con capacidad de 1 Kg y sensibilidad de 0,1 gr.
- Matraz de 500 ml de capacidad
- Molde cónico y una varilla

Muestra. - Se selecciona una muestra de 1 Kg. que puede ser obtenida por cuarteo; luego se coloca la muestra dentro de un recipiente lleno de agua y se deja allí por un periodo de 24 horas.

- **procedimiento. -**

- Se saca la muestra del recipiente y se seca de manera uniforme.
- Con el fin de inspeccionar que tan seca esta la muestra, se coloca primero en el molde cónico y luego se retira este. Si la muestra tiene todavía alguna humedad de la superficie ha sido eliminada, la arena redará libremente cuando se levante el cono.
- Por lo general si la arena rueda libremente la primera vez que se coloca el cono, esto es indicación de que la muestra ha sido secada más de lo necesario y que ha perdido su condición de saturada; por consiguiente, se deberá rociar con agua y dejarla reposar por 30 minutos antes de volver a colocarla en el cono.
- Se colocan 500 gr. de la muestra en el matraz y luego se llena este con agua hasta el tope. Con el fin de eliminar burbujas de aire presentes en el matraz, se rueda el matraz sobre sí mismo y luego se coloca en un baño a temperatura constante de 20°C, se deberán hacer las correcciones del caso siguiendo la curva de calibración. Luego se obtiene el peso del matraz lleno.
- Se vacía el contenido del matraz en un recipiente y se pone a secar en el horno de temperatura constante (105°C) y se pesará.

Cálculos. -

$$\text{Peso Específico a granel} = \frac{A}{V - W}$$

Siendo:

A = Peso en el aire de la muestra secada al horno, en gr.

V = Volumen del frasco, en ml

W = Peso en gramos o volumen en ml del agua agregado al frasco

$$\text{Peso Específico en condición saturado y superficie seca} = \frac{500}{V - W}$$

$$\text{Peso Específico} = \frac{A}{(V - W) - (500 - A)}$$

$$\% \text{ de Absorción} = \frac{500 - A}{A} \times 100$$

2.15.2.7 Peso Unitario

Este ensayo permite determinar la densidad del agregado tal como será colocado en obra, lo cual es útil para la dosificación por volumen o para la validación de mezclas.

Peso unitario suelto (PUS)

El concepto de PUS es importante cuando se trata del manejo, transporte y almacenamiento de los agregados debido a que estos se hacen en estado suelto.

Peso unitario compactado (PUC)

El PUC es importante desde el punto de vista de diseño de mezclas ya que con él se determina el volumen absoluto de los agregados por cuanto estos van a estar sometidos a una compactación durante el proceso de colocación del hormigón.

Si el peso de una muestra de agregado, compuesta por varias partículas, se divide por el volumen que ocupa esas partículas agrupadas dentro de un recipiente unitario, se obtiene lo que se denomina como peso unitario del agregado o peso volumétrico.

$$PU = \frac{P}{V}$$

Dónde:

P= Peso seco del material

V= Volumen del recipiente

El peso unitario es una propiedad física importante porque indica el grado de acomodamiento de las partículas y entre menor sea este menor será el volumen de

vacíos entre partículas que hace que la mezcla sea más económica, porque habrá menor cantidad de huecos a ser llenados con pasta de cemento. Así mismo, mientras mayor sea el peso unitario habrá mayor cantidad de granos la cual depende de la granulometría, forma, textura y tamaño de los mismos.

PUC

- El agregado se introduce en tres capas, cada una compactada con 25 golpes de varilla metálica.
- Se enrasa la superficie y se pesa el contenido del recipiente.

PUS

- El agregado se deja caer libremente en el recipiente desde una altura no mayor a 5 cm.

Se enrasa sin compactación y se pesa.

Determinación del peso unitario de los agregados

Equipo

Una varilla de 5/8" de diámetro y unos 60 cm de largo, un juego de recipientes cilíndricos.

El tamaño del molde cilíndrico que se debe usar depende del tamaño máximo de las partículas.

Para agregados con partículas de un diámetro $\leq \frac{1}{2}$ " se usa un molde de $\frac{1}{10}$ pie³.

Para agregados con partículas de un diámetro entre $\frac{1}{2}$ " y $1 \frac{1}{2}$ " se usa un molde de $\frac{1}{2}$ " pie³.

Para agregados con partículas de un diámetro $\geq 1 \frac{1}{2}$ " se usa un molde de 1 pie³.

Calibración de los moldes. - los moldes deben ser calibrados con exactitud, determinando el peso del agua a 16,7 °C requeridos para llenarlos. El volumen de cada molde se determina dividiendo el peso del agua requerida para llenar el respectivo molde por el peso unitario del agua a la misma temperatura.

Preparación de la muestra. - Se usa una muestra representativa del agregado a la humedad ambiente.

Procedimiento.

Peso Unitario Compactado:

- Se llena el molde hasta una tercera parte de su capacidad, nivelándose el agregado con las manos. Luego por medio de la varilla se apisona uniformemente esta capa 25 veces. No debe golpear el fondo del molde.
- Se repite el procedimiento anterior dos veces hasta llenar el molde. Las partículas de la superficie se deben enrasar con la varilla teniendo en cuenta como guía el borde del molde.
- Se pesa el molde junto con el agregado

Peso Unitario Suelto:

Se llena el recipiente de agregado hasta desbordar, dejando caer el agregado desde una altura no mayor de 5 cm. por encima del borde superior del recipiente. Se elimina el excedente del agregado con una regla. Luego pesamos del agregado en el recipiente.

Cálculos. - El peso neto del agregado se obtiene restando del peso del molde más la muestra compacta o suelta el peso del molde. El peso por unidad de volumen de la muestra se obtiene multiplicando su peso neto por el inverso del volumen del molde.

2.16 Dosificación de Hormigones (Método ACI 211)

La dosificación de hormigón tiene como objetivo determinar las proporciones adecuadas de los distintos componentes para obtener mezclas que cumplan con las características y propiedades especificadas en el proyecto.

Para lograrlo, es fundamental considerar tres factores principales: la resistencia del concreto, la consistencia de la mezcla y el tamaño máximo de los agregados. Estos factores están estrechamente relacionados con una variable determinante en las propiedades finales del hormigón: la relación agua/cemento (A/C).

El método ACI 211.1 proporciona un procedimiento sistemático para establecer estas proporciones, facilitando un diseño de mezcla confiable y reproducible, que garantice el desempeño esperado del hormigón en obra. (American Concrete Institute (ACI Committee 211), 1991).

- **Método del A.C.I.**

El diseño de mezclas es el proceso de selección de los materiales y sus proporciones para la producción del concreto según los requerimientos de resistencia, costos, peso, durabilidad y apariencia de acabados.

En cuanto a cantidades y proporciones, el cemento ocupa entre un 7% y 15% del volumen de la mezcla, proveyendo eficientemente propiedades de adherencia y cohesión; asimismo, los agregados, esencialmente grava y arena, ocupan entre el 59% y 76% del volumen. El agua, necesaria para la hidratación del cemento ocupa entre el 14% y 18% del volumen; y, por último, el aire atrapado en las mezclas varía entre el 1% y 3%.

El Instituto Americano del Concreto, ACI por sus siglas en inglés, a través de la norma ACI 211.1 describe dos métodos para seleccionar y ajustar las proporciones para concreto de peso y masa normal. Los procedimientos consideran requisitos como manejabilidad, consistencia, resistencia y durabilidad. (Cordero Estévez, Cárdenas Gutiérrez, & Rojas Suárez, 2018)

Datos base para el diseño de mezclas

En lo posible, las selecciones de proporciones de concreto se deben basar en datos de las experiencias con los materiales a utilizar en mezclas, pero cuando la información sea muy poca o no exista, la ACI 211.1 es una guía que puede ser utilizada. La información necesaria de los materiales disponibles puede ser:

- Análisis granulométricos de los agregados.
- Peso unitario del agregado grueso.
- Densidad aparente y absorción de los agregados.
- Requerimientos agua-mezcla en base a los agregados.
- Relaciones a/c.
- Densidad de materiales cementantes.
- Combinaciones óptimas de agregados para satisfacer la densidad del
- Concreto

Procedimientos para el diseño de mezclas

A través de la guía ACI 211.1, el Instituto Americano del Concreto establece una serie de pasos lógicos y directos para diseñar mezclas de concreto, con especificaciones que abarcan variables como la relación a/c, mínimo contenido de cemento, contenido de aire, asentamiento, máximo tamaño del agregado, resistencia y otras propiedades relacionadas con el material cementante, aditivos y agregados. Estos pasos se enuncian a continuación: (Cordero Estévez, Cárdenas Gutiérrez, & Rojas Suárez, 2018)

a) Selección de la resistencia requerida

Tabla 2.12

Resistencia de Diseño Cuando no Hay Datos que Permitan Determinar la Desviación Estándar (σ)

Resistencia específica f_{ck} en (kg/cm ²)	Resistencia de diseño de la mezcla f_{cm} en (kg/cm ²)
Menos de 210 kg/cm ²	$f_{ck} + 70$ kg/cm ²
De 210 a 350 kg/cm ²	$f_{ck} + 85$ kg/cm ²
Más de 350 kg/cm ²	$f_{ck} + 100$ kg/cm ²

Fuente: Dosificación ACI 211.1

b) Selección de asentamiento

Si el asentamiento no es especificado, un valor apropiado puede ser seleccionado a partir de la tabla 2.14.

Tabla 2.13

Asentamientos Recomendados para Diversos Tipos de Construcción y Sistemas de Colocación y Compactación

Consistencia	Asentamiento mm.	Ejemplo de Tipo de construcción	Sistema De colocación	Sistema de compactación
Muy seca	0-20	Prefabricados de alta resistencia, revestimiento de pantallas de cimentación	Con vibradores de formaleta; hormigones de proyección neumática (lanzados)	Secciones sujetas a vibración extrema, puede requerirse presión

Seca	20-35	Pavimentos	Pavimentadoras con terminadora vibratoria	Secciones sujetas a vibración intensa
Semi - seca	35-50	Pavimentos, fundaciones en hormigón simple	Colocación con máquinas operadas manualmente	Secciones simplemente reforzadas, con vibración
Media	50-100	Elementos compactados a mano, losas muros, vigas	Colocación manual	Secciones medianamente reforzadas, sin vibración
Húmeda	100-150	Elementos estructurales esbeltos	Bombeo	Secciones bastante reforzadas, sin vibración
Muy húmeda	150 o más	Elementos muy esbeltos, pilotes fundidos "in situ"	Tubo-embudo Tremie	Secciones altamente reforzadas, sin vibración (Normalmente no adecuados para vibrarse)

Fuente: Dosificación ACI 211.1

c) Selección del tamaño máximo del agregado

Los grandes tamaños máximos nominales de un agregado bien graduado, tienen menos vacíos que los tamaños más pequeños, en efecto requieren menos cantidad de mortero por unidad de volumen. Por otra parte, mejores resultados se pueden obtener con la reducción de los tamaños nominales máximos para producir altas resistencias con una relación a/c dada. Esta selección se relaciona con el paso 3, en la cual se hace la estimación del contenido de agua y aire de la mezcla, acorde con el tamaño del agregado, como es explicado en la siguiente sección.

d) Estimación de contenido de agua y aire en la mezcla

La cantidad de agua por unidad de volumen requerida, para un asentamiento dado, depende del tamaño nominal máximo, forma y gradación de los agregados principalmente. La tabla 2.15 - 2.16. muestra la cantidad de agua estimada para mezclas de varios tamaños máximos de agregados sin aire contenido en la mezcla.

Tabla 2.14

Cantidad de agua aproximada y presencia de aire para diferentes asentamientos dados. con Partículas de Forma Angular y Textura Rugosa, en Hormigón sin Aire Incluido

Asentamiento		Tamaño máximo del agregado, en mm (pulg.)							
		9.51	12.70	19.00	25.40	38.10	50.80	64.00	76.10
		3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"	2 1/2"	3"
mm	pulg.	Agua de mezclado, en Kg/m ³ de hormigón							
0	0	223	201	186	171	158	147	141	132
25	1	231	208	194	178	164	154	147	138
50	2	236	214	199	183	170	159	151	144
75	3	241	218	203	188	175	164	156	148
100	4	244	221	207	192	179	168	159	151
125	5	247	225	210	196	183	172	162	153
150	6	251	230	214	200	187	176	15	157
175	7	256	235	218	205	192	181	170	163
200	8	260	240	224	210	197	186	176	168

Fuente: Dosificación ACI 211.1

Tabla 2.15

Cantidad de agua aproximada y presencia de aire para diferentes asentamientos dados. con Partículas de Forma Redondeada y Textura Lisa, en Hormigón sin Aire Incluido

Asentamiento		Tamaño máximo del agregado, en mm (pulg.)							
		9.51	12.70	19.00	25.40	38.10	50.80	64.00	76.10
		3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"	2 1/2"	3"
mm	pulg.	Agua de mezclado, en Kg/m ³ de hormigón							
0	0	213	185	171	154	144	136	129	123
25	1	218	192	177	161	150	142	134	128
50	2	222	197	183	167	155	146	138	132
75	3	226	202	187	172	160	150	141	136
100	4	229	205	191	176	164	154	144	139
125	5	231	208	194	179	168	156	146	141
150	6	233	212	195	182	172	159	150	146
175	7	237	216	200	187	176	165	156	148
200	8	244	222	206	195	182	171	162	154

Fuente: Dosificación ACI 211.1

e) Selección de la relación a/c

La selección de la relación a/c no solo está determinada por requisitos de resistencia, sino también de durabilidad. La tabla 2.17 muestra las relaciones típicas de acuerdo a

los requisitos de resistencia (estimada a edad de 28 días) usando cemento Portland Tipo I, y su comparación con la propuesta por (Asocreto, 2011).

Tabla 2.16

Relación entre a/c y resistencia a la compresión a los 28 días de edad de curado

Resistencia a la compresión Kg/cm ²	Relación agua-cemento en peso		
	Límite superior	Línea a media	Límite inferior
140	-	0.72	0.65
175	-	0.65	0.58
210	0.7	0.58	0.53
245	0.64	0.53	0.49
280	0.59	0.48	0.45
315	0.54	0.44	0.42
350	0.49	0.40	0.38

Fuente: Dosificación ACI 211.

f) Estimación del contenido de agregado grueso

Agregados de similar tamaño nominal máximo y graduación producen concretos de manejabilidad satisfactoria, que también depende del tamaño nominal máximo y el módulo de finura; en la tabla 2.5 se indica el volumen de agregado grueso por unidad de volumen para concreto. (Cordero Estévez, Cárdenas Gutiérrez, & Rojas Suárez, 2018)

Tabla 2.17

Volumen de agregado grueso compactado por unidad de volumen de concreto

Tamaño máximo		Módulo de finura de la arena			
mm.	pulg.	2.40	2.60	2.80	3.00
9.5	3/8"	0.50	0.48	0.46	0.44
12.7	1/2"	0.59	0.57	0.55	0.53
19.0	3/4"	0.66	0.64	0.62	0.60
25.4	1"	0.71	0.69	0.67	0.65
38.1	1 1/2"	0.75	0.73	0.71	0.69
50.8	2"	0.78	0.76	0.74	0.72
76.1	3"	0.82	0.80	0.78	0.76
152.0	6"	0.87	0.85	0.83	0.81

Fuente: Dosificación ACI 211.

2.17 Proceso de Curado

El curado es el proceso de mantener el concreto húmedo y a temperatura controlada después del vaciado, para que pueda desarrollar sus propiedades mecánicas correctamente. La falta de curado o el curado inadecuado puede afectar resistencia, durabilidad y aparición de fisuras, especialmente por retracción plástica.

2.17.1 Probetas Cilíndricas (ASTM C31/C31M-19, 2019)

Desmoldeo: Se realiza generalmente a las 24 ± 2 horas (aproximadamente un día después del vaciado).

Las probetas deben haber adquirido suficiente resistencia para soportar manipulación sin dañarse.

Curado posterior: Se recomienda curado sumergido en agua durante 28 días para asegurar que el concreto desarrolle su resistencia característica.

También se puede usar cámaras húmedas, pero la sumersión asegura homogeneidad.

Tiempo de curado: ± 1 día (para cumplir los 28 días de resistencia nominal)

Manipulación de probetas antes de 24 h: puede causar fracturas y resultados no confiables.

2.17.2 Vigas Prismáticas (ASTM C192/C192M-19, 2019)

Desmoldeo: Se realiza aproximadamente 24 horas después del vaciado, similar a las probetas cilíndricas.

Curado posterior: Se recomienda sumergir las vigas en agua hasta completar los ensayos (normalmente 28 días).

Este curado evita que el concreto se seque demasiado rápido, lo que podría generar retracción prematura y fisuras.

Margen de tolerancia: Igual que probetas cilíndricas ± 1 día de variación aceptable en el curado de 28 días.

2.18 Ensayos Mecánicos en el Hormigón

2.18.1 Compresión

La resistencia a la compresión simple constituye la principal propiedad mecánica del hormigón, siendo una medida clave para evaluar su capacidad estructural. Esta propiedad se define como la capacidad del material para soportar cargas axiales aplicadas sobre una unidad de área, y se expresa habitualmente en unidades de esfuerzo tales como kg/cm².

El método estándar para determinar esta resistencia es el ensayo de compresión sobre probetas cilíndricas, fabricadas con moldes normalizados de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura. Este procedimiento permite evaluar la calidad del hormigón en estado endurecido y verificar si cumple con las especificaciones técnicas del diseño estructural.

La resistencia a la compresión puede ser diseñada de forma que las mezclas de hormigón logren un amplio espectro de propiedades mecánicas y niveles de durabilidad, adecuados a las exigencias del proyecto. En consecuencia, esta propiedad se ha consolidado como el principal parámetro de referencia para el diseño y control de calidad en obras de infraestructura civil, siendo ampliamente utilizada por los ingenieros estructurales en edificaciones, pavimentos, obras hidráulicas y estructuras especiales.

Procedimiento:

Preparación de probetas:

- Cilindros de 150 × 300 mm o 100 × 200 mm, moldeados y curados conforme a ASTM C31/C31M.
- Desmoldados a las 24 ± 2 horas y curados en agua hasta la edad de ensayo 28 días.

Alineación en la máquina:

- Colocar el cilindro en la prensa de compresión con el eje vertical.
- Ajustar las superficies de carga para que sean paralelas y uniformes.

Aplicación de carga:

- La carga se aplica axialmente y sin impactos.

- La tasa de carga debe ser de $0,25 \pm 0,05$ MPa/s hasta la falla.

Registro de resultados:

- Se registra la carga máxima (P) soportada por la probeta.
- La resistencia a compresión se calcula:

$$f_c = \frac{P}{A}$$

donde:

f_c = resistencia a la compresión del hormigón kg/cm² (S.T.G.)

P = carga máxima de rotura aplicada kgf (S.T.G.)

A = área transversal de la probeta cm² (S.T.G.)

2.18.2 Tracción

La resistencia a la flexión es una propiedad fundamental del hormigón que refleja su capacidad para resistir esfuerzos de tracción indirecta. Este parámetro se asocia directamente con la resistencia a la falla por momento flector de elementos estructurales no reforzados, como vigas o losas de concreto.

El ensayo se realiza sobre probetas prismáticas de hormigón, típicamente de (150 mm x 150 mm) de sección transversal, apoyadas en una luz libre no menor a tres veces su altura, conforme a lo establecido en la norma ASTM C78/C78M-22 (ensayo con carga aplicada en los tercios del claro).

El resultado del ensayo se expresa como el módulo de rotura (R), generalmente en MPa o psi, y representa el esfuerzo máximo que el hormigón puede resistir antes de fracturarse por flexión.

Este módulo de rotura suele representar entre el 10% y el 20% de la resistencia a compresión del hormigón, dependiendo de diversos factores como el tipo y tamaño del agregado grueso, las proporciones de la mezcla y la calidad del curado. Aunque existe cierta correlación empírica entre ambas propiedades, la resistencia a flexión debe determinarse experimentalmente cuando se requiere un diseño más preciso o se trata de aplicaciones sensibles a esfuerzos de tracción.

Procedimiento:**Preparación de probetas:**

- Vigas de $150 \times 150 \times 500$ mm o de longitud suficiente para que la relación luz/profundidad sea ≥ 16 .

Colocación en el aparato:

- La viga se apoya en dos rodillos (apoyos simples).
- Se colocan dos cargas iguales aplicadas a un tercio de la luz de apoyo, generando una zona de momento constante en el tercio central.

Aplicación de carga:

- La carga se aplica de manera continua y sin impactos.
- La tasa de aplicación debe generar un incremento de $0,06 \pm 0,02$ MPa/s en la fibra extrema en tensión.

Registro de resultados:

- Se registra la carga máxima (P).
- La resistencia a flexión o módulo de ruptura (f_r) se calcula:

$$f_r = \frac{P \times L}{b \times d^2}$$

donde:

f_r = módulo de ruptura o resistencia a la flexión del hormigón, en kg/cm² (S.T.G.)

P = carga máxima aplicada en el ensayo, en kgf (S.T.G.)

L = luz entre apoyos de la viga, en cm (S.T.G.), que representa la geometría del ensayo

b = ancho de la viga, en cm (S.T.G.)

d = altura efectiva de la viga, en cm (S.T.G.)

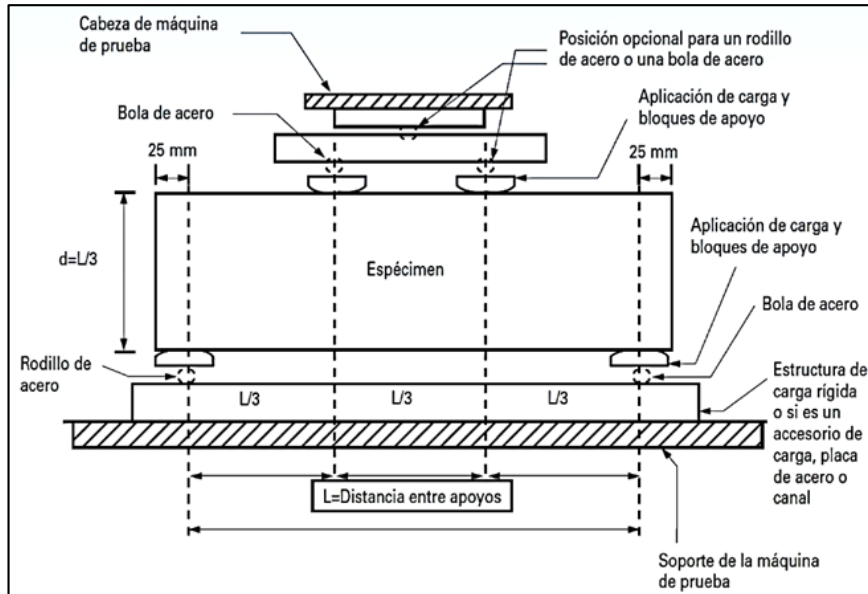
Nota: Si la fisura ocurre fuera del tercio central de la luz, ASTM C78/C78M-22 establece un factor de corrección:

$$f_r = \frac{3P \times a}{b \times d^2}$$

donde a es la distancia desde el apoyo hasta el punto de aplicación de la carga que provocó la fractura.

Figura 2.13

Aparato para la prueba de resistencia a la flexión con carga en los tercios del claro



Fuente: Determinación del esfuerzo a la flexión del hormigón ASTM C78

2.18.3 Retracción Plástica (ASTM C1579-13, 2013)

Alcance

- Este método de ensayo compara el agrietamiento superficial de paneles de hormigón reforzado con fibra con el agrietamiento superficial de paneles de hormigón de control sometidos a condiciones prescritas de restricción y pérdida de humedad lo suficientemente severas como para producir agrietamiento antes del fraguado final del hormigón.
- Este método de ensayo puede utilizarse para comparar el comportamiento del agrietamiento por contracción plástica de diferentes mezclas de hormigón que contienen refuerzo de fibra.
- Los valores indicados en unidades del Sistema Internacional (SI) deben considerarse estándar. No se incluyen otras unidades de medida en esta norma.
- Esta norma no pretende abordar todas las preocupaciones de seguridad, si las hubiera, asociadas con su uso. Es responsabilidad del usuario de esta norma

establecer prácticas adecuadas de seguridad y salud y determinar la aplicabilidad de las limitaciones regulatorias antes de su uso. (Advertencia: Las mezclas cementosas hidráulicas frescas son cáusticas y pueden causar quemaduras químicas en la piel y los tejidos tras una exposición prolongada).

Resumen del método de ensayo

- Los paneles de hormigón de control y hormigón reforzado con fibras se preparan según lo prescrito y se someten a condiciones de secado controladas tras su acabado. Las condiciones de secado deben ser lo suficientemente rigurosas como para inducir el agrietamiento por contracción plástica en los paneles de prueba de hormigón de control. La velocidad de evaporación de una superficie de agua libre se controla mediante bandejas colocadas junto a los paneles en la cámara ambiental.

***Nota 1** Un parámetro importante en este método es la tasa de pérdida de agua por evaporación, la cual se controla mediante las condiciones atmosféricas que rodean las muestras de ensayo. Dado que las muestras de hormigón no siempre presentan la misma tasa de evaporación que la bandeja de agua (debido a los efectos de evaporación y exudación), la tasa de evaporación de $1,0 \text{ kg/m}^2\cdot\text{h}$ de la bandeja de agua representa la tasa mínima de evaporación que debe alcanzarse para este ensayo. La pérdida de humedad de los paneles de ensayo de hormigón también puede monitorizarse y reportarse; sin embargo, la tasa de evaporación de la superficie libre del agua en la bandeja es el parámetro que debe utilizarse para cuantificar el entorno de secado.*

- El ensayo finaliza al momento del fraguado final del hormigón, determinado de acuerdo con el Método de Ensayo C403/C403M. Transcurridas 24 h desde el mezclado inicial, se determina el ancho promedio de fisura.
- Se calcula la relación de reducción de fisura (CRR) a partir del ancho promedio de fisura de los paneles de hormigón reforzado con fibra y del ancho promedio de fisura de los paneles de hormigón de control.

Importancia y uso

- El método de ensayo tiene como objetivo evaluar los efectos de la evaporación, el asentamiento y la retracción temprana en el comportamiento del hormigón reforzado con fibras frente al agrietamiento por retracción plástica hasta y durante algunas horas después del fraguado final.
- Los valores medidos obtenidos en este ensayo pueden utilizarse para comparar el comportamiento de hormigones con diferentes proporciones de mezcla, hormigones con y sin fibras, hormigones que contienen diversas cantidades de diferentes tipos de fibras, y hormigones que contienen diversas cantidades y tipos de aditivos. Para realizar comparaciones significativas, las condiciones de evaporación durante el ensayo deberán ser suficientes para producir un ancho de grieta promedio de al menos 0,5 mm en las muestras de control, Además, la tasa de evaporación desde una superficie libre de agua deberá estar dentro del $\pm 5\%$ para cada ensayo.

Nota 2 Para lograr tasas de evaporación que resulten en una grieta de al menos 0,5 mm en las muestras de control, puede ser necesario utilizar una tasa de evaporación superior a la descrita en la Nota 1.

- Este método intenta controlar las variables atmosféricas para cuantificar el rendimiento relativo de una mezcla de hormigón fresco dada. Dado que muchas otras variables, como la finura del cemento, la granulometría y el volumen de los áridos, los procedimientos de mezcla, el asentamiento, el contenido de aire, la temperatura del hormigón y el acabado superficial también pueden influir en el posible agrietamiento, se debe prestar atención para mantener estos valores lo más consistentes posible entre mezclas.

Aparatos

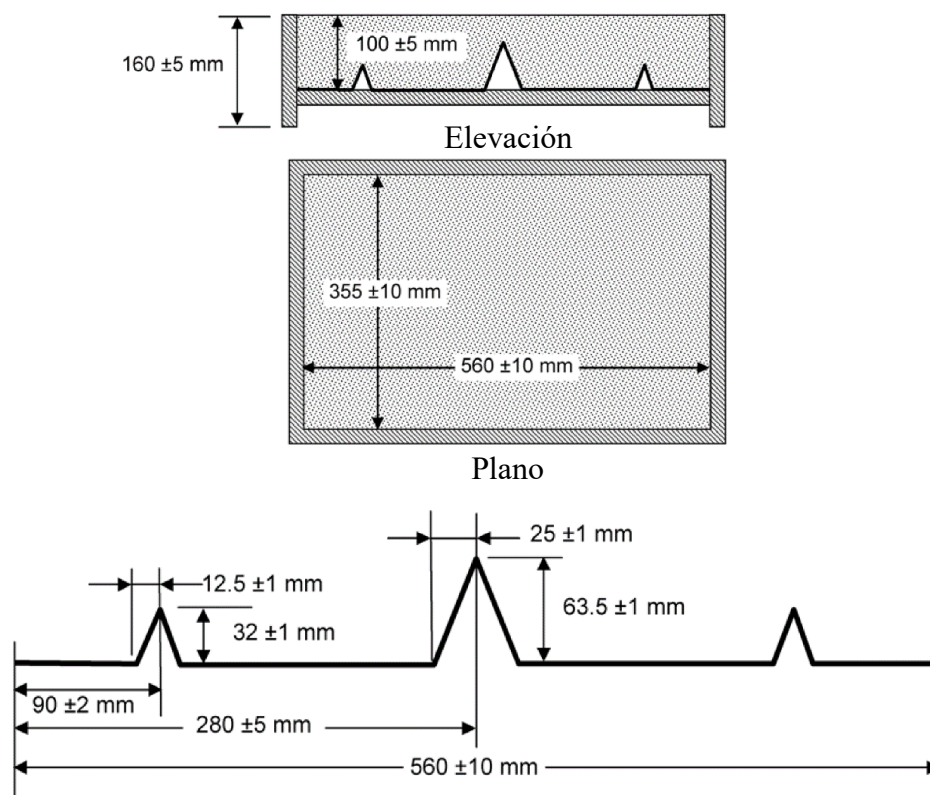
Moldes:

- Para un tamaño máximo de agregado grueso igual o inferior a 19 mm, utilice un molde con una profundidad de 100 ± 5 mm y dimensiones rectangulares de 355 ± 10 mm por 560 ± 15 mm Ver la Fig. El molde puede fabricarse de metal, plástico o madera contrachapada.

Nota 3: Si se utiliza madera contrachapada para los moldes, esta debe tener baja absorción de humedad. El molde debe construirse para ser ligero y rígido. Los moldes, correctamente contruidos, deben durar aproximadamente 50 usos.

- Este método de ensayo está diseñado para agregados menores o iguales a 19 mm. Para agregados gruesos mayores a 19 mm, la profundidad del molde debe ser de al menos 65 mm más al menos el doble del tamaño máximo del agregado grueso.
- **Elevador de tensión y restricciones internas:** Las restricciones internas y el elevador de tensión se doblarán a partir de una sola pieza de chapa metálica, como se ilustra en la Fig. o se fabricarán a partir de una pieza sólida de acero. La chapa metálica tendrá un espesor de $1,2 \pm 0,05$ mm y Dos de 32 ± 1 mm de alto.

Geometría del espécimen y del elevador de tensión.



Fuente: ASTM C1579

Las sujeciones se colocan a 90 ± 2 mm hacia el interior de cada extremo del molde. El elevador de tensión central tiene una altura de 64 ± 2 mm y sirve como punto de inicio del agrietamiento. Este elevador de tensión de chapa metálica, con sujeciones internas, debe encajar en el fondo del molde

- **Utilice aceite desmoldante:** para recubrir el inserto metálico y los lados del molde a fin de reducir la adherencia con el hormigón. Se considera que el inserto y el molde están correctamente aceitados cuando toda la superficie está recubierta y el exceso de aceite se ha eliminado con un paño limpio y seco.
- **Ventiladores de velocidad variable:** Los ventiladores utilizados deberán alcanzar una velocidad del viento superior a 4,7 m/s en toda la superficie del panel de prueba.
- **Cámara ambiental:** El uso de una caja de ventilador en una cámara ambiental permite producir un flujo de aire uniforme sobre la superficie del panel. Una cubierta transparente sobre los paneles facilitará la obtención de un flujo de aire uniforme y permitirá la observación de grietas. Otro método para producir un flujo de aire uniforme consiste en utilizar una cámara ambiental diseñada específicamente, como se muestra en el Anexo V, Se puede utilizar un calentador, un humidificador y un deshumidificador disponibles comercialmente para mantener las condiciones ambientales especificadas. Esta prueba se realiza utilizando cualquiera de los aparatos que se muestran en el Anexo V, exponiendo los paneles a una tasa de evaporación de al menos 1,0 kg/m²·h (Ver la Nota 1). Para la prueba estándar, la temperatura debe mantenerse a 36 ± 3 °C, la humedad relativa debe ser del 30 ± 10 % y la velocidad del viento debe ser suficiente para mantener la tasa mínima de evaporación durante la prueba.

Nota 4 Antes de hormigonar los paneles de hormigón, se deben verificar las variables atmosféricas en las instalaciones ambientales para determinar si se pueden lograr las condiciones de evaporación necesarias. Una velocidad del viento de 4,7 m/s debería ser suficiente para alcanzar la tasa mínima de evaporación especificada, pero podría

requerirse una velocidad mayor para obtener un ancho de grieta promedio suficiente en algunos paneles de control.

- **Sensores:** Utilice sensores de temperatura, humedad y velocidad del viento para medir la temperatura ambiente del aire y de la superficie del hormigón con una precisión de 0,5 °C, la humedad relativa con una precisión del 10 % y la velocidad del aire con una precisión de 0,1 m/s.
- **Plataforma vibratoria:** Cualquier dispositivo que pueda consolidar completamente el panel de ensayo y que cumpla con los requisitos mínimos de frecuencia establecidos en la Práctica C192/C192M para un vibrador externo es adecuado.
- **Equipo de acabado superficial:** Se utilizará una regla de hierro angular para el hormigón después de la vibración. Se utilizará una llana de magnesio, acero o madera para el acabado de la superficie de la muestra después del enrasado.
- **Bandeja de Monitoreo:** Se requiere una bandeja adecuada para exponer el agua a la corriente de aire para cada panel de prueba de concreto. Los lados de la bandeja deben ser verticales. La bandeja debe tener el tamaño suficiente para exponer al menos $0,1 \pm 0,01$ m² de agua a la corriente de aire. El borde expuesto de la bandeja no debe sobresalir más de 5 mm por encima del nivel del agua al inicio de la prueba.

Nota 5. Los paneles de prueba y las bandejas de monitoreo pueden colocarse en una cámara ambiental diseñada para este método de prueba (Ver Anexo V) o pueden colocarse aguas abajo de los paneles en una caja de ventilación (Ver Anexo V).

- **Báscula:** Si el especificador de las pruebas requiere la tasa de pérdida de humedad de los paneles de prueba, pese los paneles de prueba con una báscula con una capacidad de al menos 100 kg y una precisión del 0,1 % de la carga de prueba. Pese el control de la tasa de evaporación.
Platos con una balanza o báscula con una capacidad mínima de 3 kg y una precisión de 5 g.
- **Herramienta de medición de grietas:** Se puede utilizar un microscopio óptico portátil, un comparador de grietas o un sistema de análisis de imágenes. La

herramienta de medición debe ser capaz de medir el ancho de la grieta con una precisión de al menos 0,05 mm. Si se utiliza un sistema de análisis de imágenes automatizado, se debe demostrar que proporciona una medición precisa. Para demostrar la precisión de la medición, el sistema se utilizará para medir una entalla de 0,5 mm mecanizada en una pieza de acero, y el ancho de la entalla reportado debe estar dentro de $\pm 0,05$ mm del ancho mecanizado.

Muestreo, Probetas y Unidades de Ensayo

- **Unidad de Ensayo:** Una unidad de ensayo se compone de al menos dos probetas de control y al menos dos probetas de hormigón reforzado con fibras con las mismas proporciones de mezcla. Se debe ensayar un grupo de dos probetas de control en cada ocasión para determinar la reducción de grietas por retracción plástica del hormigón reforzado con fibras.

Procedimiento

- Determine el asentamiento de cada mezcla de acuerdo con el Método de Ensayo C143/C143M.
- Prepare las muestras para determinar el tiempo de fraguado de acuerdo con el Método de Ensayo C403/C403M. Si el hormigón reforzado con fibras no se tamiza fácilmente en húmedo, utilice la muestra de hormigón de control para medir el tiempo de fraguado final de las mezclas de control y reforzada con fibras. Coloque las muestras de tiempo de fraguado en la corriente de aire de modo que estén expuestas a las mismas condiciones ambientales que los paneles de contracción plástica.
- Llene los moldes de los paneles con una sola capa. Consolide el hormigón con vibración externa hasta que esté aproximadamente a nivel con la parte superior del molde. Enrase cada muestra perpendicularmente al elevador de tensión tres veces.
- Después del enrasado, llene las muestras con un número predeterminado de pasadas. Si se desea determinar la pérdida de humedad del panel, retire cualquier residuo de hormigón adherido al exterior del molde y pese cada panel dentro del molde.

- Coloque un panel de mezcla de hormigón reforzado con fibra y un panel de mezcla de control en la cámara ambiental aguas abajo de los ventiladores.
- Encienda los ventiladores, que se han pre ajustado para alcanzar la velocidad del aire necesaria para obtener las condiciones de evaporación requeridas. La evaluación del agrietamiento comienza en este momento.
- Al inicio de la prueba y a intervalos de 30 minutos, registre la temperatura del aire, la humedad relativa y la velocidad del flujo de aire en un punto situado a 100 ± 5 mm por encima de la superficie de cada panel. Si así lo requiere el responsable de las pruebas, registre el momento en que se observa el primer agrietamiento en cada superficie del panel. Realice pruebas de penetración en intervalos de tiempo regulares según el método de ensayo C403/C403M. Continúe registrando las variables ambientales hasta el momento del fraguado final.
- La tasa de evaporación se determina pesando inicialmente los platos de monitoreo llenos al inicio de la prueba y a intervalos de 30 minutos posteriormente (3). Registre la pérdida de masa con una precisión de 5 g en cada pesada. Para determinar la tasa de evaporación durante cada intervalo de tiempo, divida la pérdida de masa entre pesadas sucesivas por la superficie del agua en el plato de pesaje y el intervalo de tiempo entre pesadas sucesivas (Ver la Nota 6). La prueba no es válida si la tasa de evaporación promedio es inferior a $1,0 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$.

Nota 6 Se deben realizar ajustes a la velocidad del viento si es necesario.

Mantener la tasa de evaporación al nivel requerido. Se sugiere colocar las bandejas de monitoreo sobre básculas en la corriente de aire para un monitoreo continuo sin necesidad de retirarlas periódicamente durante la prueba. Si esto no es posible, la bandeja de monitoreo debe retirarse de la corriente de aire, pesarse y reincorporarse a ella en un plazo de 15 segundos.

- Tras el fraguado final (utilice el tiempo de fraguado medido en las dos muestras, el que sea más tarde), registre las variables atmosféricas, detenga los ventiladores, registre el tiempo y determine la pérdida total de agua de las

bandejas de monitoreo. Si se debe determinar la pérdida de humedad de los paneles.

Cuantificación del agrietamiento

- Cuantifique la cantidad de agrietamiento midiendo el ancho de las grietas en la superficie de los paneles 24 ± 2 h después de la mezcla.

Nota 7 Los estudios han demostrado que, cuando los paneles están cubiertos con plástico, no hay un cambio apreciable en el ancho promedio de grieta desde un tiempo de seis horas hasta 24 horas después de la mezcla (5).

- Para evitar posibles efectos de los límites del panel en el ancho de las grietas, no mida el ancho de las grietas a menos de 25 mm de los límites del panel de prueba.
- Mida el ancho de cada grieta a lo largo de su trayectoria sobre el elevador de tensión, en orden progresivo, de un lado del panel al otro. Si se utiliza un procedimiento manual de medición del ancho de grieta, utilice un comparador de grietas o un microscopio de grietas para medir el ancho de las grietas. Mida el ancho de la grieta con una precisión de 0,1 mm a intervalos de 10 mm a lo largo de la grieta.

Repita el procedimiento anterior hasta haber medido todas las grietas. Si se utiliza un procedimiento de análisis de imágenes para la medición del ancho de grieta, registre los anchos de grieta en la misma distancia de medición (Ver la Nota 8). Se debe eliminar el solapamiento entre imágenes adyacentes para evitar mediciones duplicadas. Registre todos los anchos de grieta para calcular el ancho promedio de grieta.

Nota 8 Se puede utilizar una máscara de cuadrícula para muestrear los anchos de grieta en ubicaciones predeterminadas.

- Calcule el ancho promedio de grieta con una precisión de 0,05 mm. Si no se observa un ancho promedio de grieta de al menos 0,5 mm en los paneles de control (promedio de al menos dos paneles), y ningún panel de control tiene un ancho promedio de grieta inferior a 0,4 mm, la prueba no es válida. Aumente la

velocidad de evaporación para alcanzar este ancho promedio mínimo de grieta y repita la prueba.

Nota 9 Exigir un ancho mínimo de grieta en el panel de control ayudará a evitar que modificaciones marginales en la mezcla de hormigón muestren una mejora estadísticamente significativa del rendimiento, lo cual podría no ser suficiente para controlar la fisuración en condiciones de campo.

- Calcule la relación de reducción de grietas (CRR) utilizando la siguiente ecuación:

$$CRR = \left[1 - \frac{\text{Ancho promedio de fisura de la mezcla de hormigón reforzado con fibras}}{\text{Ancho promedio de fisura de la mezcla de hormigón de control}} \right] \times 100\%$$

2.19 Normativas a Utilizar en el Procedimiento Experimental.

Para el análisis de las propiedades físicas y mecánicas de los agregados, así como para el análisis de propiedades del hormigón en su estado fresco y endurecido, se realizarán basados en el Manual de Carreteras Volumen 4 (manual de ensayos de suelos y materiales hormigones) y en las normas ASTM, como se detalla a continuación.

Tabla 2.18

Lista de los ensayos aplicados

Nº	Ensayo	Normas
1	Método para extraer y preparar muestras	H0101 — ASTM C-75
2	Método para el cuarteo de muestras con Cuarteador Metálico	H0102 — ASTM C-702 / AASHTO T248
3	Método para tamizar y determinar la granulometría	H0104 — ASTM C-136
4	Contenido total de agua de los áridos por secado	H0107 — ASTM C-566
5	Método para determinar la densidad aparente	H0108 — ASTM C-29

6	Método para determinar la densidad real, densidad neta y la absorción de agua en los áridos gruesos	H0109 — ASTM C-127
7	Método para determinar la densidad real, densidad neta y la absorción de agua en los áridos finos	H0110 — ASTM C-128
8	Método para determinar la docilidad mediante el cono de Abrams	H0304 — ASTM C-143
9	Método de ensayo resistencia a la flexión de probetas prismáticas	H0310 — ASTM C-78
10	Práctica estándar para hacer y curar especímenes de prueba de hormigón en el laboratorio	ASTM C-192
11	Método de prueba estándar para la evaluación de agrietamiento por retracción plástica restringida de un hormigón reforzado con fibras	ASTM C-1579
12	Granulometría	ASTM C33/C33M-08
13	Dosificación de hormigones	ACI 211.1
14	Proceso de curado Probetas cilíndricas compresion	ASTM C31/C31M-19
15	Proceso de curado Vigas prismáticas	ASTM C192/C192M-19
16	Ensayo de resistencia a compresión	ASTM C39

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO III
DESARROLLO DE LA
INVESTIGACIÓN

CAPÍTULO III

DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Generalidades

Este capítulo comprende el desarrollo de la parte experimental de la investigación, la cual se llevó a cabo en el laboratorio de hormigones de la UAJMS. Aquí se describen los procedimientos empleados, los ensayos realizados y los resultados obtenidos, organizados de la siguiente manera:

- **Planillas de caracterización de materiales:** Se presentan los formatos estandarizados utilizados en el laboratorio para registrar las propiedades físicas y mecánicas de los materiales que conforman las mezclas de prueba. En estas planillas se detallan los resultados necesarios para sustentar el estudio y cumplir los objetivos planteados.
- **Dosificación de mezclas:** Se expone el cálculo de la dosificación del hormigón patrón, así como la variación en los porcentajes de microfibras incorporadas en cada mezcla experimental.
- **Ensayos de compresión y tracción:** Se incluyen las planillas con los resultados de los ensayos de rotura de probetas, a partir de los cuales se procesaron los datos para determinar la resistencia a compresión y a tracción del hormigón.
- **Ensayo de retracción plástica (ASTM C1579):** Se presentan los resultados obtenidos en las losas de prueba del hormigón reforzadas con fibras, conforme a la metodología establecida por la norma.
- **Diagramas de resultados:** Se muestran los gráficos correspondientes a las resistencias obtenidas, con el fin de analizar el comportamiento de las mezclas.
- **Análisis de fisuración:** Se ilustran y describen las fisuras observadas en los ensayos de retracción plástica, complementando el estudio con un análisis comparativo de su evolución.
- **Comparación de mezclas:** Finalmente, se incluyen diagramas comparativos que permiten evaluar de manera global el desempeño de las distintas mezclas ensayadas.

3.2 Tamaño de muestra

Tabla 3.1

Cantidad de vigas a realizar para análisis de resistencia

CARACTERÍSTICAS DEL HORMIGÓN	Resistencia a flexión 28 días			SUB TOTAL
	TOL	SBL	CHZ	
Hormigón sin adición de fibras (control)	4	4	4	12
H° con 0.40 kg/m ³ de fibra de vidrio	4	4	4	12
H° con 0.70 kg/m ³ de fibra de vidrio	4	4	4	12
H° con 1.00 kg/m ³ de fibra de vidrio	4	4	4	12
H° con 1.30 kg/m ³ de fibra de vidrio	4	4	4	12
Total				60

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.2

Cantidad paneles de hormigón para los ensayos de retracción plástica

CARACTERÍSTICAS DEL HORMIGÓN	N° de paneles de hormigón para los ensayos de retracción plástica			SUB TOTAL
	TOL	SBL	CHZ	
Hormigón sin adición de fibras (control)	4	4	4	12
H° con 0.40 kg/m ³ de fibra de vidrio	4	4	4	12
H° con 0.70 kg/m ³ de fibra de vidrio	4	4	4	12
H° con 1.00 kg/m ³ de fibra de vidrio	4	4	4	12
H° con 1.30 kg/m ³ de fibra de vidrio	4	4	4	12
Total				60

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.3

Cantidad de probetas cilíndricas

CARACTERÍSTICAS DEL HORMIGÓN	Resistencia a Compresión 28 días			TOTAL
	TOL	SBL	CHZ	
Hormigón sin adición de fibras (control)	4	4	4	12

Fuente: Elaboración propia.

3.3 Levantamiento de Información

3.3.1 Ubicación de la Fuente de los Materiales a Utilizarse

3.3.1.1 Agregado Pétreo

La ciudad de Tarija cuenta con diversos bancos de materiales pétreos que abastecen a los proyectos de construcción de la región, garantizando disponibilidad y continuidad en la provisión de áridos. Para la presente investigación se consideraron tres principales fuentes de agregados:

- **Chancadora Tolomosa:** ubicada a una distancia aproximada de 12 km de la ciudad de Tarija. Es una de las chancadoras con mayor producción en la zona, proveyendo áridos para diferentes tipos de obras.
- **Chancadora San Blas:** situada a aproximadamente 11 km de la ciudad de Tarija, reconocida como una de las canteras empleadas en la provisión de áridos para la construcción. Se tiene referencia de que su material proviene mayormente del río Guadalquivir, donde se realiza la extracción de grava y arena para su posterior trituración.
- **Canto Rodado La Chozza:** localizada a unos 25 km de la ciudad de Tarija, corresponde a un banco natural de áridos, con predominio de material de origen fluvial proveniente del río Guadalquivir, especialmente canto rodado utilizado en la fabricación de hormigón.

En esta investigación se consideran como agregados pétreos los siguientes materiales:

- Grava $\frac{3}{4}$ "
- Arena seleccionada

Figura 3.1

Ubicación, banco de agregados Tolomosa



Fuente: Google Earth

Figura 3.2

Banco de agregado pétreo



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.3

Ubicación, banco de agregados San Blas



Fuente: Google Earth

Figura 3.4

Banco de agregado pétreo



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.5

Ubicación, banco de agregados La Chozas



Fuente: Google Earth

3.4 Ensayos de Caracterización de los Componentes del Hormigón

3.4.1 Granulometría de la Grava.

Previo al ensayo de granulometría, la muestra de agregado grueso fue reducida mediante el método de cuarteo utilizando un separador mecánico, de acuerdo con lo establecido en la norma ASTM C702/C702M. Este procedimiento garantiza la representatividad de la muestra a ensayar y evita sesgos en los resultados.

Posteriormente, se llevó a cabo el análisis granulométrico de la grava conforme a las especificaciones de la norma ASTM. Para ello se emplearon los tamices normalizados correspondientes, un horno de temperatura constante de 105 ± 5 °C, utilizado para el secado de las muestras, y una balanza con sensibilidad de ± 0.1 g, requerida para

obtener resultados confiables en la determinación de las fracciones retenidas en cada tamiz.

Figura 3.6

Separador mecánico



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.7

Juego de tamices



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.4

Granulometría de la grava Tolomosa

Peso Total (g)			4707.3				
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret. (g)	Ret. Acum (g)	% Ret	% q. pasa del total	Especificacion ASTM C-33	
2 1/2"	63	0.00	0.00	0.00	100.0	100	100
2	50.8	0.00	0.00	0.00	100.0	100	100
1 1/2	38.10	0.00	0.00	0.00	100.0	100	100
1	25.40	11.20	11.20	0.24	99.8	95	100
3/4	19.05	77.30	88.50	1.88	98.1		
1/2	12.50	2842.20	2930.70	62.26	37.7	25	60
3/8	9.50	1013.10	3943.80	83.78	16.2		
Nº4	4.80	723.30	4667.10	99.15	0.9	0	10
BASE	0	37.10	4704.20	99.93	0.0		
SUMA		4704.20					
PÉRDIDAS		3.10					
MF =		6.85					

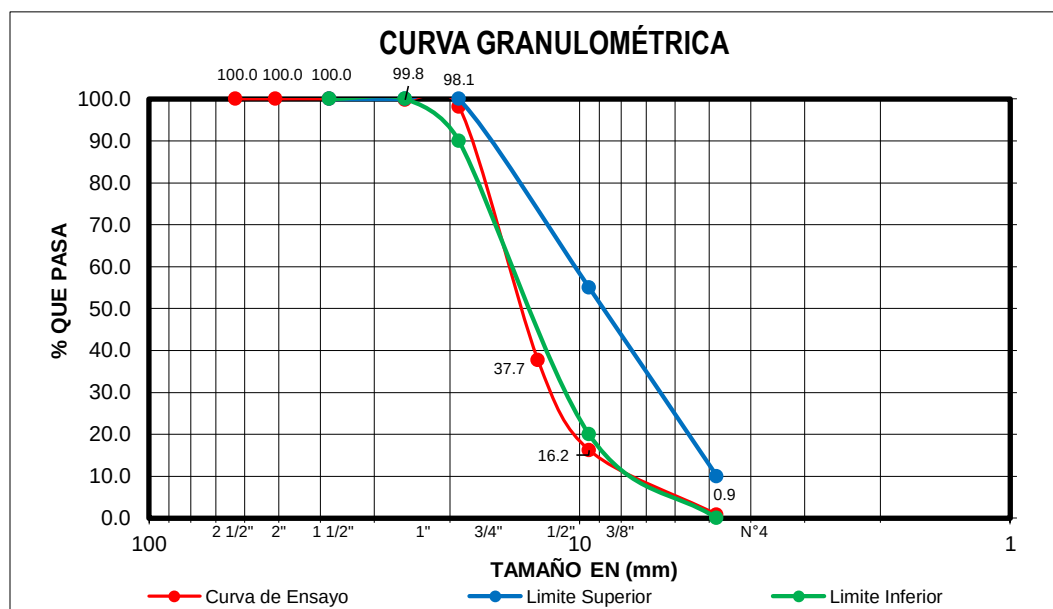
TAMAÑO MAX = 1 1/2 "

TAMAÑO M.N. = 1 "

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.8

Curva granulométrica Tolomosa



Fuente: Elaboración propia

Aumento de Vacíos (Porosidad) La falta de estas partículas intermedio finas provoca que el agregado grueso esté pobremente graduado o sea discontinuo. El material no se empaqueta eficientemente, dejando más huecos en el hormigón, lo que incrementa el consumo de pasta de cemento.

Tabla 3.5

Granulometría de la grava San Blas

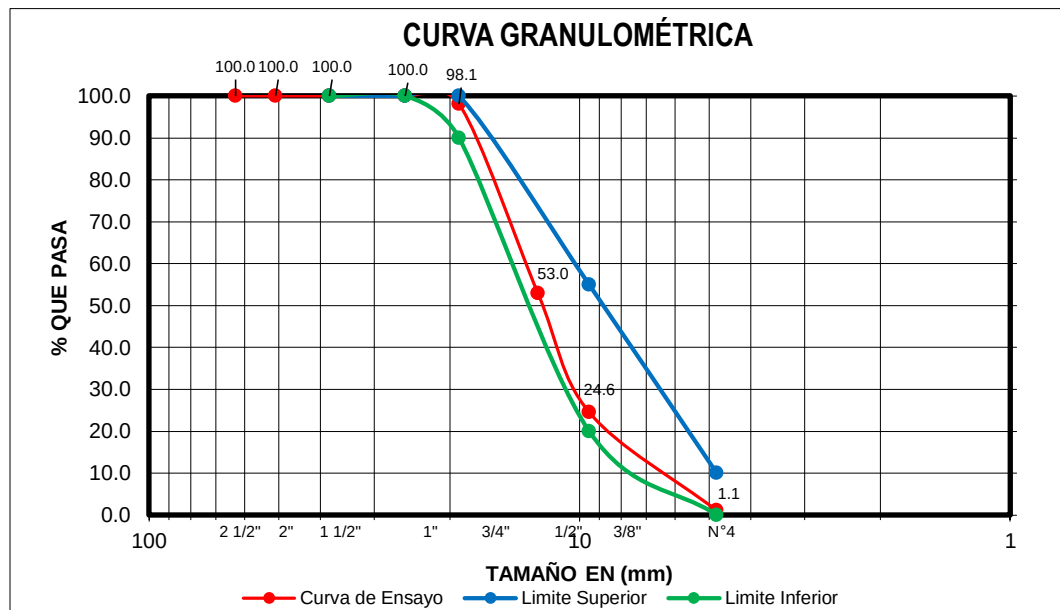
Peso Total (g)			5323.6				
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret. (g)	Ret. Acum (g)	% Ret	% q. pasa del total	Especificacion ASTM C-33	
2 1/2"	63	0.00	0.00	0.00	100.0	100	100
2	50.8	0.00	0.00	0.00	100.0	100	100
1 1/2	38.10	0.00	0.00	0.00	100.0	100	100
1	25.40	0.00	0.00	0.00	100.0	100	100
3/4	19.05	102.90	102.90	1.93	98.1	90	100
1/2	12.50	2401.00	2503.90	47.03	53.0		
3/8	9.50	1510.90	4014.80	75.42	24.6	20	55
Nº4	4.80	1249.50	5264.30	98.89	1.1	0	10
BASE	0	58.40	5322.70	99.98	0.0		
SUMA		5322.70					
PÉRDIDAS		0.90					
MF =		6.76					

TAMAÑO MAX = 1 "
TAMAÑO M.N. = 3/4 "

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.9

Curva granulométrica San Blas



Fuente: Elaboración propia

Cumple todos los requisitos de granulometría para su tamaño nominal, La curva se encuentra completamente dentro de los límites de ASTM C-33. Su porcentaje de paso está cerca del Límite Inferior en el tamiz 3/8 (24.6% vs. 20%), lo que indica una ligera escasez de finos dentro de la grava, pero es la opción más viable sin correcciones, esto garantiza un buen empaquetamiento y baja porosidad del agregado, reduciendo la demanda de pasta.

Tabla 3.6

Granulometría de la grava La Choza

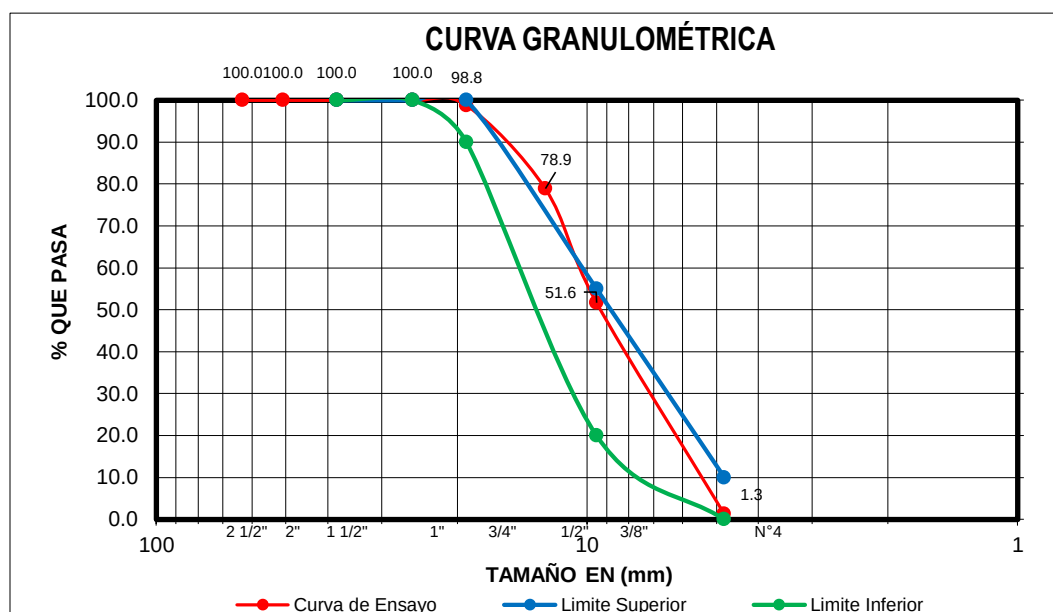
Peso Total (g)			5706.3				
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret. (g)	Ret. Acum (g)	% Ret	% q. pasa del total	Especificacion ASTM C-33	
2 1/2"	63	0.00	0.00	0.00	100.0	100	100
2	50.8	0.00	0.00	0.00	100.0	100	100
1 1/2	38.10	0.00	0.00	0.00	100.0	100	100
1	25.40	0.00	0.00	0.00	100.0	100	100
3/4	19.05	69.70	69.70	1.22	98.8	90	100
1/2	12.50	1134.60	1204.30	21.10	78.9		
3/8	9.50	1555.00	2759.30	48.36	51.6	20	55
Nº4	4.80	2875.10	5634.40	98.74	1.3	0	10
BASE	0	54.50	5688.90	99.70	0.0		
SUMA		5688.90					
PÉRDIDAS		17.40					
MF =		6.48					

TAMAÑO MAX = 1 "
TAMAÑO M.N. = 3/4 "

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.10

Curva granulométrica La Choza



Fuente: Elaboración propia

Alta Demanda de Agua y Cemento El exceso de finos (partículas más pequeñas que 1/2 en la grava significa que hay una superficie total mucho mayor que recubrir con pasta. Esto causa una demanda excesiva de agua, lo que reduce la resistencia (por mayor a/c) y aumenta el costo (por mayor consumo de cemento).

3.4.2 Peso Unitario de la Grava.

3.4.2.1 Método de Compactado.

El ensayo de peso unitario de la grava se realizó siguiendo el método de compactado en un molde con capacidad de 14 L. El material se colocó en tres capas, cada una de las cuales fue compactada aplicando 25 golpes uniformemente distribuidos con una varilla metálica, conforme a lo establecido en las normas ASTM.

Para el control de masa, el material se secó en un horno de temperatura constante de $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, empleándose una balanza con sensibilidad de $\pm 0.5\text{ g}$ para las mediciones.

Figura 3.11

Ensayo de peso unitario compactado



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.7

Peso unitario de la grava (compactado) Tolomosa

PESO UNITARIO COMPACTADO					
MUESTRA N°	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm ³)	PESO RECIP. + MUESTRA COMPACTADA (gr)	PESO MUESTRA COMPACTADA (gr)	PESO UNITARIO COMPACTADA (gr/cm ³)
1	5720.00	9977.16	20505.00	14785.00	1.482
2	5840.00	9977.16	20485.00	14645.00	1.468
3	5745.00	9977.16	20065.00	14320.00	1.435
PROMEDIO					1.462

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.8*Peso unitario de la grava (compactado) San Blas*

PESO UNITARIO COMPACTADO					
MUESTRA Nº	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm ³)	PESO RECIP. + MUESTRA COMPACTADA (gr)	PESO MUESTRA COMPACTADA (gr)	PESO UNITARIO COMPACTADA (gr/cm ³)
1	5720.00	9977.16	20515.00	14795.00	1.483
2	5240.00	9977.16	21090.00	15850.00	1.589
3	5745.00	9977.16	20645.00	14900.00	1.493
PROMEDIO					1.522

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.9*Peso unitario de la grava (compactado) La Choza*

PESO UNITARIO COMPACTADO					
MUESTRA Nº	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm ³)	PESO RECIP. + MUESTRA COMPACTADA (gr)	PESO MUESTRA COMPACTADA (gr)	PESO UNITARIO COMPACTADA (gr/cm ³)
1	5720.00	9977.16	22070.00	16350.00	1.639
2	5885.00	9977.16	22305.00	16420.00	1.646
3	5745.00	9977.16	21965.00	16220.00	1.626
PROMEDIO					1.637

Fuente: Elaboración propia

3.4.2.2 Método de Suelto.

El ensayo de peso unitario en condición suelta se realizó en un molde con capacidad de 14 L, el cual fue llenado sin aplicar ningún tipo de compactación, siguiendo lo establecido por la norma ASTM C29/C29M.

Previamente, la grava fue secada en un horno a temperatura constante de $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, y las mediciones de masa se efectuaron utilizando una balanza con sensibilidad de $\pm 0.1\text{ g}$.

Figura 3.12

Ensayo de peso unitario suelto



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.10

Peso unitario suelto de la grava Tolomosa

PESO UNITARIO SUELTO					
MUESTRA Nº	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm3)	PESO RECIP. + MUESTRA SUELTA (gr)	PESO MUESTRA SUELTA (gr)	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm3)
1	5720.00	9977.16	19535.00	13815.00	1.385
2	5840.00	9977.16	19475.00	13635.00	1.367
3	5745.00	9977.16	19015.00	13270.00	1.330
PROMEDIO					1.360

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.11

Peso unitario suelto de la grava San Blas

PESO UNITARIO SUELTO					
MUESTRA Nº	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm3)	PESO RECIP. + MUESTRA SUELTA (gr)	PESO MUESTRA SUELTA (gr)	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm3)
1	5720.00	9977.16	19105.00	13385.00	1.342
2	5240.00	9977.16	19220.00	13980.00	1.401
3	5745.00	9977.16	19215.00	13470.00	1.350
PROMEDIO					1.364

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.12

Peso unitario suelto de la grava La Choza

PESO UNITARIO SUELTO					
MUESTRA N°	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm3)	PESO RECIP. + MUESTRA SUELTA (gr)	PESO MUESTRA SUELTA (gr)	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm3)
1	5720.00	9977.16	20630.00	14910.00	1.494
2	5885.00	9977.16	20930.00	15045.00	1.508
3	5745.00	9977.16	20760.00	15015.00	1.505
PROMEDIO					1.502

Fuente: Elaboración propia

3.4.3 *Peso específico y Absorción de la Grava.*

El mencionado ensayo de laboratorio se realizó siguiendo el procedimiento establecido por la norma ASTM correspondiente. Para la preparación de la muestra se utilizó un horno de temperatura constante de $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, y para la determinación de las masas se empleó una balanza con sensibilidad de $\pm 0.5\text{ g}$.

Figura 3.13

Secado de la grava



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.14

Equipo para peso específico grava



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.13

Peso específico de la grava Tolomosa

MUESTRA N°	PESO MUESTRA SECADA "A" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA CON SUP. SECA "B" (gr)	PESO MUESTRA SAT. DENTRO DEL AGUA "C" (gr)	PESO ESPECÍFICO A GRANEL (gr/cm ³)	PESO ESPECÍFICO S.S.S. (gr/cm ³)	PESO ESPECÍFICO APARENTE (gr/cm ³)	% DE ABS.
1	4957.90	5050.40	3098.00	2.54	2.59	2.67	1.87
2	4986.90	5051.90	3135.00	2.60	2.64	2.69	1.30
3	4989.80	5049.60	3148.00	2.62	2.66	2.71	1.20
PROMEDIO				2.59	2.63	2.69	1.46

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.14

Peso específico de la grava San Blas

MUESTRA N°	PESO MUESTRA SECADA "A" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA CON SUP. SECA "B" (gr)	PESO MUESTRA SAT. DENTRO DEL AGUA "C" (gr)	PESO ESPECÍFICO A GRANEL (gr/cm ³)	PESO ESPECÍFICO S.S.S. (gr/cm ³)	PESO ESPECÍFICO APARENTE (gr/cm ³)	% DE ABS.
1	4974.80	5059.40	3120.00	2.57	2.61	2.68	1.70
2	4974.60	5053.20	3110.00	2.56	2.60	2.67	1.58
3	4964.90	5027.90	3095.00	2.57	2.60	2.66	1.27
PROMEDIO				2.56	2.60	2.67	1.52

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.15

Peso específico de la grava La Chozza

MUESTRA N°	PESO MUESTRA SECADA "A" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA CON SUP. SECA "B" (gr)	PESO MUESTRA SAT. DENTRO DEL AGUA "C" (gr)	PESO ESPECÍFICO A GRANEL (gr/cm ³)	PESO ESPECÍFICO S.S.S. (gr/cm ³)	PESO ESPECÍFICO APARENTE (gr/cm ³)	% DE ABS.
1	4973.80	5017.30	3155.00	2.67	2.69	2.73	0.87
2	4953.30	5055.20	3117.00	2.56	2.61	2.70	2.06
3	4962.80	5056.60	3116.00	2.56	2.61	2.69	1.89
PROMEDIO				2.59	2.64	2.71	1.61

Fuente: Elaboración propia

3.4.4 Granulometría de la Arena.

El ensayo de granulometría de la arena se efectuó siguiendo el procedimiento indicado por la norma ASTM C136/C136M. Se utilizaron los tamices normalizados correspondientes, un horno de temperatura constante de $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ para el secado previo de la muestra, y una balanza con sensibilidad de $\pm 0.1\text{ g}$ para la determinación precisa de los pesos retenidos en cada tamiz.

Figura 3.15

Juego de tamices



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.16

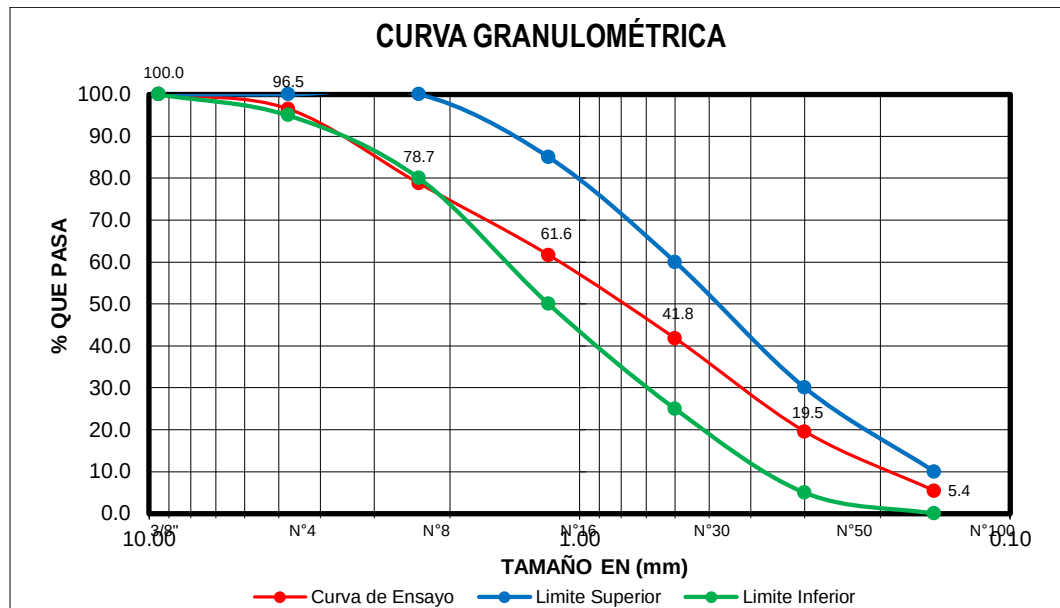
Granulometría de la arena Tolomosa

Peso Total (g)			1000				
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret. (g)	Ret. Acum (g)	% Ret	% q. pasa del total	Especificacion ASTM C-33	
3/8	9.50	0.00	0.00	0.00	100.0	100	100
N°4	4.75	35.20	35.20	3.52	96.5	95	100
N°8	2.36	177.60	212.80	21.28	78.7	80	100
N°16	1.18	170.90	383.70	38.37	61.6	50	85
N°30	0.60	198.80	582.50	58.25	41.8	25	60
N°50	0.30	222.10	804.60	80.46	19.5	5	30
N°100	0.15	141.40	946.00	94.60	5.4	0	10
BASE		53.60	999.60	99.96	0.0		
SUMA		999.6					
PÉRDIDAS		0.4					
MF =		2.96					

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.16

Curva granulométrica del agregado fino



Fuente: Elaboración propia

Riesgo de Segregación Su MF es alto (cercano a 3.1), lo que la clasifica como arena gruesa. Aunque cumple, la deficiencia de finos (partículas pequeñas) reduce la cohesión de la mezcla, volviéndola más propensa a la segregación y dificultando el acabado superficial.

Tabla 3.17

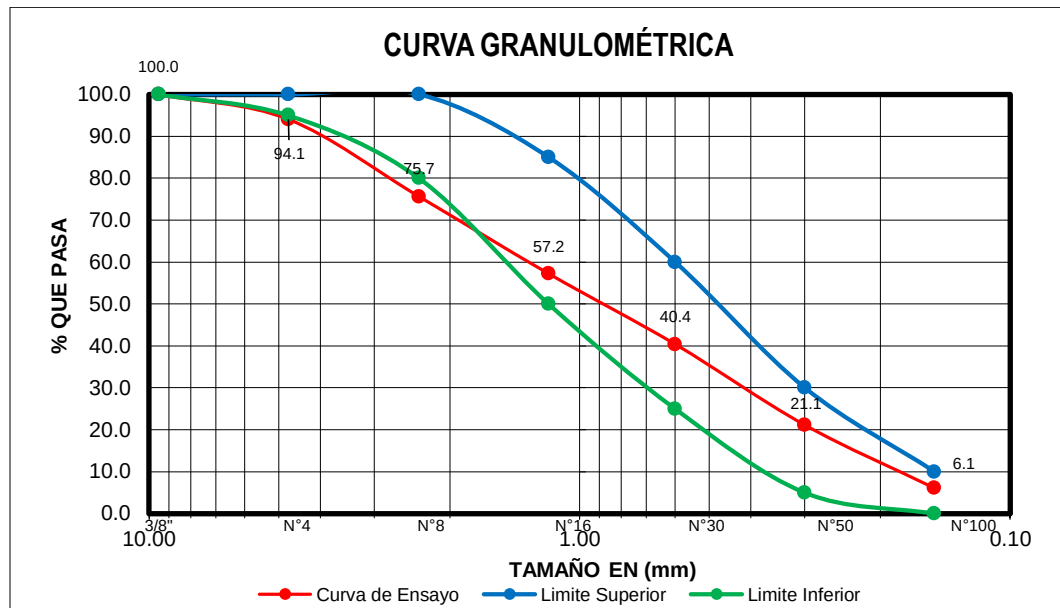
Granulometría de la arena San Blas

Peso Total (g)			1000				
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret. (g)	Ret. Acum (g)	% Ret	% q. pasa del total	Especificacion ASTM C-33	
3/8	9.50	0.00	0.00	0.00	100.0	100	100
N°4	4.75	59.00	59.00	5.90	94.1	95	100
N°8	2.36	184.50	243.50	24.35	75.7	80	100
N°16	1.18	184.10	427.60	42.76	57.2	50	85
N°30	0.60	168.30	595.90	59.59	40.4	25	60
N°50	0.30	192.90	788.80	78.88	21.1	5	30
N°100	0.15	150.50	939.30	93.93	6.1	0	10
BASE		60.50	999.80	99.98	0.0		
SUMA		999.8					
PÉRDIDAS		0.2					
MF =		3.05					

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.17

Curva granulométrica del agregado fino



Fuente: Elaboración propia

Peor Trabajabilidad y Acabado Con el MF más alto (3.05), es la arena más gruesa. La mayor deficiencia de finos la hace la menos cohesiva y más difícil de terminar, requiriendo más esfuerzo o aditivos para alcanzar la trabajabilidad deseada sin comprometer la resistencia.

Tabla 3.18

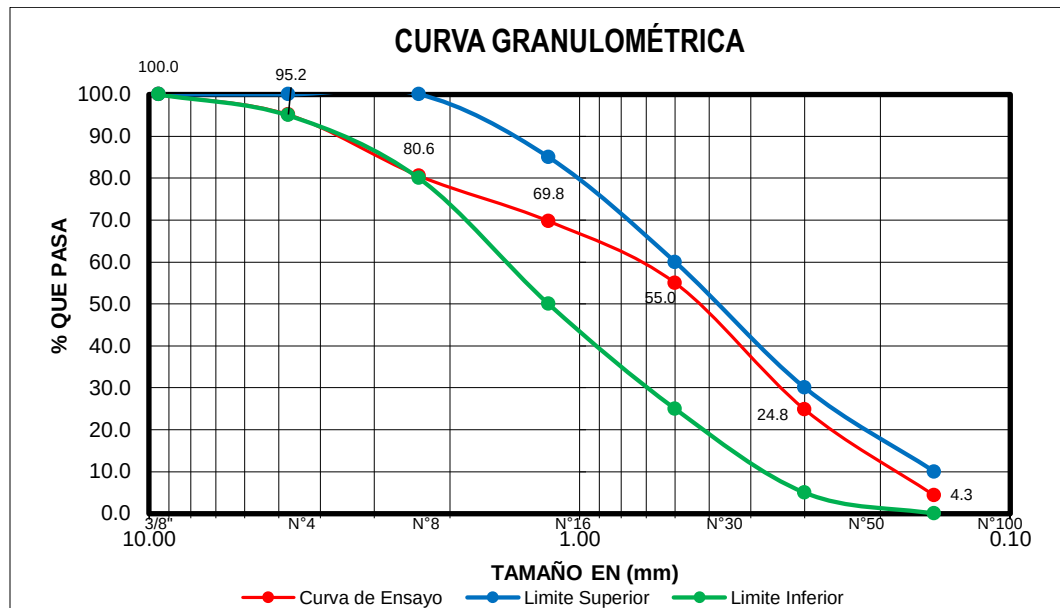
Granulometría de la arena La Chozza

Peso Total (g)			1000				
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret. (g)	Ret. Acum (g)	% Ret	% q. pasa del total	Especificacion ASTM C-33	
3/8	9.50	0.00	0.00	0.00	100.0	100	100
N°4	4.75	48.10	48.10	4.81	95.2	95	100
N°8	2.36	146.20	194.30	19.43	80.6	80	100
N°16	1.18	108.10	302.40	30.24	69.8	50	85
N°30	0.60	147.50	449.90	44.99	55.0	25	60
N°50	0.30	302.10	752.00	75.20	24.8	5	30
N°100	0.15	205.10	957.10	95.71	4.3	0	10
BASE		42.60	999.70	99.97	0.0		
SUMA		999.7					
PÉRDIDAS		0.3					
MF =		2.70					

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.18

Curva granulométrica del agregado fino



Fuente: Elaboración propia

Mejor Opción Con el MF más bajo (2.70), esta arena es la mejor graduada. Proporciona la mejor cohesión y trabajabilidad a la mezcla, minimizando el riesgo de segregación y facilitando la obtención de una superficie lisa.

3.4.5 *Peso Unitario de la Arena.*

3.4.5.1 **Método de Compactado.**

El ensayo se realizó en un molde con capacidad de 3 L, llenándolo en tres capas, cada una compactada mediante 25 golpes con la varilla, conforme a lo establecido en la norma ASTM C29/C29M. Para la determinación de las masas se utilizó un horno de temperatura constante de $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una balanza con sensibilidad de $\pm 0.5\text{ g}$.

Figura 3.19

Peso unitario de la arena compactada



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.19*Peso unitario de la arena compactado Tolomosa*

PESO UNITARIO COMPACTADO					
MUESTRA Nº	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm3)	PESO RECIP. + MUESTRA COMPACTADA (gr)	PESO MUESTRA SUELTA (gr)	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm3)
1	2605.00	3092.00	8050.00	5445.00	1.761
2	2605.00	3092.00	7955.00	5350.00	1.730
3	2605.00	3092.00	7950.00	5345.00	1.729
PROMEDIO					1.740

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.20*Peso unitario de la arena compactado San Blas*

PESO UNITARIO COMPACTADO					
MUESTRA Nº	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm3)	PESO RECIP. + MUESTRA COMPACTADA (gr)	PESO MUESTRA SUELTA (gr)	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm3)
1	2605.00	3092.00	7950.00	5345.00	1.729
2	2605.00	3092.00	7890.00	5285.00	1.709
3	2605.00	3092.00	8060.00	5455.00	1.764
PROMEDIO					1.734

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.21*Peso unitario de la arena compactado La Chozza*

PESO UNITARIO COMPACTADO					
MUESTRA Nº	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm3)	PESO RECIP. + MUESTRA COMPACTADA (gr)	PESO MUESTRA SUELTA (gr)	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm3)
1	2605.00	3092.00	7820.00	5215.00	1.687
2	2605.00	3092.00	7860.00	5255.00	1.700
3	2605.00	3092.00	7835.00	5230.00	1.691
PROMEDIO					1.693

Fuente: Elaboración propia.

3.4.5.2 Método de Suelto.

El ensayo se efectuó en un molde con capacidad de 14 L, llenando el material en tres capas conforme a lo establecido por las normas ASTM. Para la determinación de la masa, la muestra fue secada en un horno de temperatura constante de $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y pesada utilizando una balanza con sensibilidad de $\pm 0.5\text{ g}$.

Figura 3.20

Ensayo de peso unitario suelto



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.22

Peso unitario de la Arena suelto Tolomosa

PESO UNITARIO SUELTO					
MUESTRA Nº	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm3)	PESO RECIP. + MUESTRA SUELTA (gr)	PESO MUESTRA SUELTA (gr)	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm3)
1	2605.00	3092.00	7485.00	4880.00	1.578
2	2605.00	3092.00	7585.00	4980.00	1.611
3	2605.00	3092.00	7580.00	4975.00	1.609
PROMEDIO					1.599

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.23

Peso unitario de la Arena suelto San Blas

PESO UNITARIO SUELTO					
MUESTRA Nº	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm3)	PESO RECIP. + MUESTRA SUELTA (gr)	PESO MUESTRA SUELTA (gr)	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm3)
1	2605.00	3092.00	7985.00	5380.00	1.740
2	2605.00	3092.00	7535.00	4930.00	1.594
3	2605.00	3092.00	7555.00	4950.00	1.601
PROMEDIO					1.645

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.24

Peso unitario de la Arena suelta La Choza

PESO UNITARIO SUELTO					
MUESTRA Nº	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm3)	PESO RECIP. + MUESTRA SUELTA (gr)	PESO MUESTRA SUELTA (gr)	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm3)
1	2605.00	3092.00	7315.00	4710.00	1.523
2	2605.00	3092.00	7435.00	4830.00	1.562
3	2605.00	3092.00	7255.00	4650.00	1.504
PROMEDIO					1.530

Fuente: Elaboración propia

3.4.6 *Peso Específico y Absorción de la Arena.*

El ensayo de peso específico y absorción de la arena se realizó siguiendo los procedimientos establecidos por las normas ASTM C127 y C128. Para ello, se utilizó un horno de temperatura constante de $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, una balanza con sensibilidad de $\pm 0.1\text{ g}$ y un matraz de 500 ml con tolerancia de $\pm 0.25\text{ ml}$.

Este procedimiento permitió determinar tanto la densidad aparente de los sólidos como la cantidad de agua que puede absorber la arena.

Figura 3.21

Matraz graduado para peso específico aparente de la arena



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.22

Matraz graduado para peso específico aparente de la arena



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.25*Peso Específico de la arena Tolomosa*

MUESTRA	PESO	PESO	MUESTRA +	AGUA	PESO	VOL. DEL	P. E.	P. E.	P. E.	%
N°	MUESTRA	MATRÁZ	MATRAZ +	AGREG. AL	MUESTRA	MATRÁZ	A GRANEL	SAT. CON	APARENTE	DE
	(gr)	(gr)	AGUA	MATRÁZ "W"	SECA "A"	"V"	(gr/cm3)	SUP. SECA	(gr/cm3)	ABSORC.
			(gr)	(ml) ó (gr)	(gr)	(ml)		(gr/cm3)		
1	500	221.60	1036.90	315.30	490.9	500.00	2.66	2.71	2.80	1.82
2	500	248.20	1030.70	282.50	492.40	500.00	2.26	2.30	2.35	1.52
3	500	167.10	998.20	331.10	490.60	500.00	2.90	2.96	3.08	1.88
PROMEDIO							2.61	2.66	2.74	1.74

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.26*Peso Específico de la arena San Blas*

MUESTRA	PESO	PESO	MUESTRA +	AGUA	PESO	VOL. DEL	P. E.	P. E.	P. E.	%
N°	MUESTRA	MATRÁZ	MATRAZ +	AGREG. AL	MUESTRA	MATRÁZ	A GRANEL	SAT. CON	APARENTE	DE
	(gr)	(gr)	AGUA	MATRÁZ "W"	SECA "A"	"V"	(gr/cm3)	SUP. SECA	(gr/cm3)	ABSORC.
			(gr)	(ml) ó (gr)	(gr)	(ml)		(gr/cm3)		
1	500	195.90	981.90	286.00	490.9	500.00	2.29	2.34	2.40	1.82
2	500	237.00	1043.00	306.00	490.40	500.00	2.53	2.58	2.66	1.92
3	500	193.60	991.40	297.80	490.80	500.00	2.43	2.47	2.54	1.84
PROMEDIO							2.42	2.46	2.53	1.86

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.27*Peso Específico de la arena La Choz*

MUESTRA	PESO	PESO	MUESTRA +	AGUA	PESO	VOL. DEL	P. E.	P. E.	P. E.	%
N°	MUESTRA	MATRÁZ	MATRAZ +	AGREG. AL	MUESTRA	MATRÁZ	A GRANEL	SAT. CON	APARENTE	DE
	(gr)	(gr)	AGUA	MATRÁZ "W"	SECA "A"	"V"	(gr/cm3)	SUP. SECA	(gr/cm3)	ABSORC.
			(gr)	(ml) ó (gr)	(gr)	(ml)		(gr/cm3)		
1	500	221.60	1025.80	304.20	493.1	500.00	2.52	2.55	2.61	1.38
2	500	247.90	1029.20	281.30	490.70	500.00	2.24	2.29	2.34	1.86
3	500	166.90	997.90	331.00	493.10	500.00	2.92	2.96	3.04	1.38
PROMEDIO							2.56	2.60	2.67	1.54

Fuente: Elaboración propia

3.5 Cemento Utilizado.

En la presente investigación se empleará el cemento portland fabricado por la empresa Soboce de su Fabrica ‘El Puente, que abastece a la ciudad de Tarija, es un cemento portland IP-30.

Especificaciones Técnicas

- ✓ Norma técnica: Norma Boliviana NB-011
- ✓ Tipo de cemento: IP-30
- ✓ Presentación: bolsas de 50 Kg.
- ✓ Peso específico del cemento 3,15 gr/cm³ aproximado

Características

- Producto obtenido de la molienda conjunta de Clinker, yeso y puzolana.
- Desprende menor calor de hidratación, lo que reduce la retracción térmica debido a la inclusión de puzolana.
- Mayor trabajabilidad en morteros y revestimientos

3.6 Dosificación Método ACI – 211

Proyecto:	Proyecto de Ingeniería Civil II	Identif. Muestra:	Dosificación
Procedencia:	Tolomosa (21°34'44.87"S - 64°45'9.47"O)	Laboratorista:	Espino Condori Vekin Galo
Fecha:	11 de Agosto de 2025		

CARACTERISTICAS DE LOS AGREGADOS

ENSAYO	Unidad	Valor
1.- Modulo de finura de la arena (MF)	s/u	2.96
2.- Peso unitario Compactado de la grava (PUC)	kg/m ³	1462
3.- Peso específico de la arena (γ_f)	gr/cm ³	2.61
4.- Peso específico de la grava (γ_g)	gr/cm ³	2.59
5.- Absorción de la arena (Aa)	%	1.74
6.- Absorción de la Grava (Ag)	%	1.5
7.- Humedad de la Arena (Ha)	%	1.54
8.- Humedad de la Grava (Hg)	%	1.20
9.- Tamaño máximo Nominal (TMN)	pulg	1 "
10.- Tamaño Máximo (TM)	pulg	1 1/2 "
11.- Peso específico del cemento	gr/cm ³	3.15

CARACTERISTICAS DEL DISEÑO

Resistencia de diseño (f_{ck}')	250	kg/cm ²
Resistencia Característica (f_{ck}) (Tabla 11.12)	335	kg/cm ²
Asentamiento (S) (Tabla 11.4)	2	pulg
Relacion Agua / Cemento (a/c) (Tabla 11,13)	0.42	s/u

DATOS DE TABLAS

Vol. Agr. Grueso / Vol. unitario concreto (b/bo) (Tabla 11.15)	0.69	s/u
Requerimiento de Agua (A) (Tabla 11.6)	155	kg/m ³

CALCULOS

Peso Agregado Grueso (Pag)	= (b/bo)xPUC 1014.399817 kg/m ³
Peso cemento (Pc)	= A / (a/c) 371.70 kg/m ³
Volumen de Agregado Grueso (Vag)	= Pag/γg 391.92 lt/m ³
Volumen del cemento (Vc)	= Pc/γc 118.00 lt/m ³
Volumen de Arena (Vaf)	= 1000 - Vc - A - Vag 335.08 lt/m ³
Peso del agregado fino (Paf)	= Vaf x γf 874.17 kg/m ³

PESOS SECOS DE LOS INGREDIENTES POR (m³) DE CONCRETO

Ingrediente	Peso Seco kg/m ³	Volumen Absoluto lt/m ³	Peso especifico gr/cm ³
Cemento	371.70	118.00	3.15
Agua	155.00	155.00	1.00
Grava	1014.40	391.92	2.59
Arena	874.17	335.08	2.61
TOTAL	2415.27	1000.00	

PESOS HUMEDOS DE LOS MATERIALES

Peso Húmedo de la arena (Pha)	= Paf x (1 + Ha) 887.66 kg/m ³
Peso Húmedo de la Grava (Phg)	= Pag x (1 + Hg) 1026.56 kg/m ³

CORRECCION DEL AGUA

Agua corregida a la grava (Acg)	= Pag x (Ag - Hg) 2.61 lt/m ³
Agua corregida a la Arena (Acf)	= Paf x (Aa - Ha) 1.72 lt/m ³
Total Agua Corregida (Atc)	= Acg + Acf 4.33 lt/m ³

PESOS HUMEDOS DE LOS INGREDIENTES POR (m³) DE HORMIGON

Ingrediente	Peso Seco kg/m ³	Peso Húmedo kg/m ³
Cemento	371.70	371.70
Agua	155.00	159.33
Grava	1014.40	1026.56
Arena	874.17	887.66
TOTAL	2415.27	2445.25

PROPORCIONES DE MEZCLA

Cemento	Arena	Gravilla
1.0	2.35	2.73

OBSERVACIONES

1.- Las humedades tanto de la grava como de la arena corresponden a las obtenidas en laboratorio debiendo hacer las correcciones adecuadas en obra en el momento del vaciado.

2.- La presente dosificación no tendrá efecto en caso de agregados contaminados o sucios, con: Arcillas o finos, materiales orgánicos, residuos de otros materiales, etc. Por lo que se recomienda lavar siempre los áridos antes de utilizarlos.

Proyecto:	Proyecto de Ingeniería Civil II	Identif. Muestra:	Dosificación
Procedencia:	San Blas (21°34'49.40"S - 64°42'14.59"O)	Laboratorista:	Espino Condori Vekin Galo
Fecha:	11 de Agosto de 2025		

CARACTERISTICAS DE LOS AGREGADOS

ENSAYO	Unidad	Valor
1.- Modulo de finura de la arena (MF)	s/u	3.05
2.- Peso unitario Compactado de la grava (PUC)	kg/m ³	1522
3.- Peso específico de la arena (γ _f)	gr/cm ³	2.42
4.- Peso específico de la grava (γ _g)	gr/cm ³	2.56
5.- Absorción de la arena (A _a)	%	1.86
6.- Absorción de la Grava (A _g)	%	1.5
7.- Humedad de la Arena (H _a)	%	1.85
8.- Humedad de la Grava (H _g)	%	1.27
9.- Tamaño máximo Nominal (TMN)	pulg	3/4 "
10.- Tamaño Máximo (TM)	pulg	1 "
11.- Peso específico del cemento	gr/cm ³	3.15

CARACTERISTICAS DEL DISEÑO

Resistencia de diseño (f _{ck} ')	250	kg/cm ²
Resistencia Característica (f _{ck}) (Tabla 11.12)	335	kg/cm ²
Asentamiento (S) (Tabla 11.4)	2	pulg
Relacion Agua / Cemento (a/c) (Tabla 11.13)	0.42	s/u

DATOS DE TABLAS

Vol. Agr. Grueso / Vol. unitario concreto (b/bo) (Tabla 11.15)	0.65	s/u
Requerimiento de Agua (A) (Tabla 11.6)	167	kg/m ³

CALCULOS

Peso Agregado Grueso (Pag)	= (b/bo)xPUC 989.0669667 kg/m ³
Peso cemento (Pc)	= A / (a/c) 400.48 kg/m ³
Volumen de Agregado Grueso (Vag)	= Pag/γg 385.66 lt/m ³
Volumen del cemento (Vc)	= Pc/γc 127.14 lt/m ³
Volumen de Arena (Vaf)	= 1000 - Vc - A - Vag 320.20 lt/m ³
Peso del agregado fino (Paf)	= Vaf x γf 773.72 kg/m ³

PESOS SECOS DE LOS INGREDIENTES POR (m³) DE CONCRETO

Ingrediente	Peso Seco kg/m ³	Volumen Absoluto lt/m ³	Peso especifico gr/cm ³
Cemento	400.48	127.14	3.15
Agua	167.00	167.00	1.00
Grava	989.07	385.66	2.56
Arena	773.72	320.20	2.42
TOTAL	2330.26	1000.00	

PESOS HUMEDOS DE LOS MATERIALES

Peso Húmedo de la arena (Pha)	= Paf x (1 + Ha) 788.06 kg/m ³
Peso Húmedo de la Grava (Phg)	= Pag x (1 + Hg) 1001.62 kg/m ³

CORRECCION DEL AGUA

Agua corregida a la grava (Acg)	= Pag x (Ag - Hg) 2.45 lt/m ³
Agua corregida a la Arena (Acf)	= Paf x (Aa - Ha) 0.05 lt/m ³
Total Agua Corregida (Alc)	= Acg + Acf 2.50 lt/m ³

PESOS HUMEDOS DE LOS INGREDIENTES POR (m³) DE HORMIGON

Ingrediente	Peso Seco kg/m ³	Peso Húmedo kg/m ³
Cemento	400.48	400.48
Agua	167.00	169.50
Grava	989.07	1001.62
Arena	773.72	788.06
TOTAL	2330.26	2359.65

PROPORCIONES DE MEZCLA

Cemento	Arena	Gravilla
1.0	1.93	2.47

OBSERVACIONES

1.- Las humedades tanto de la grava como de la arena corresponden a las obtenidas en laboratorio debiendo hacer las correcciones adecuadas en obra en el momento del vaciado.

2.- La presente dosificación no tendrá efecto en caso de agregados contaminados o sucios, con: Arcillas o finos, materiales orgánicos, residuos de otros materiales, etc. Por lo que se recomienda lavar siempre los áridos antes de utilizarlos.

Proyecto:	Proyecto de Ingeniería Civil II	Identif. Muestra:	Dosificación
Procedencia:	La Choza (21°40'55.51"S - 64°36'48.81"O)	Laboratorista:	Espino Condori Vekin Galo
Fecha:	11 de Agosto de 2025		

CARACTERISTICAS DE LOS AGREGADOS

ENSAYO	Unidad	Valor
1.- Modulo de finura de la arena (MF)	s/u	2.70
2.- Peso unitario Compactado de la grava (PUC)	kg/m ³	1637
3.- Peso específico de la arena (yf)	gr/cm ³	2.56
4.- Peso específico de la grava (yg)	gr/cm ³	2.59
5.- Absorción de la arena (Aa)	%	1.54
6.- Absorción de la Grava (Ag)	%	1.6
7.- Humedad de la Arena (Ha)	%	1.40
8.- Humedad de la Grava (Hg)	%	0.87
9.- Tamaño máximo Nominal (TMN)	pulg	3/4 "
10.- Tamaño Máximo (TM)	pulg	1 "
11.- Peso específico del cemento	gr/cm ³	3.15

CARACTERISTICAS DEL DISEÑO

Resistencia de diseño (fck)	250	kg/cm ²
Resistencia Característica (fck) (Tabla 11.12)	335	kg/cm ²
Asentamiento (S) (Tabla 11.4)	2	pulg
Relacion Agua / Cemento (a/c) (Tabla 11,13)	0.42	s/u

DATOS DE TABLAS

Vol. Agr. Grueso / Vol. unitario concreto (b/bo) (Tabla 11.15)	0.68	s/u
Requerimiento de Agua (A) (Tabla 11.6)	167	kg/m ³

CALCULOS

Peso Agregado Grueso (Pag)	= (b/bo)xPUC 1112.981605 kg/m ³
Peso cemento (Pc)	= A / (a/c) 400.48 kg/m ³
Volumen de Agregado Grueso (Vag)	= Pag/γg 428.96 lt/m ³
Volumen del cemento (Vc)	= Pc/γc 127.14 lt/m ³
Volumen de Arena (Vaf)	= 1000 - Vc - A - Vag 276.90 lt/m ³
Peso del agregado fino (Paf)	= Vaf x γf 708.85 kg/m ³

PESOS SECOS DE LOS INGREDIENTES POR (m³) DE CONCRETO

Ingrediente	Peso Seco kg/m ³	Volumen Absoluto lt/m ³	Peso especifico gr/cm ³
Cemento	400.48	127.14	3.15
Agua	167.00	167.00	1.00
Grava	1112.98	428.96	2.59
Arena	708.85	276.90	2.56
TOTAL	2389.31	1000.00	

PESOS HUMEDOS DE LOS MATERIALES

Peso Húmedo de la arena (Pha)	= Paf x (1 + Ha) 718.77 kg/m ³
Peso Húmedo de la Grava (Phg)	= Pag x (1 + Hg) 1122.72 kg/m ³

CORRECCION DEL AGUA

Agua corregida a la grava (Acg)	= Pag x (Ag - Hg) 8.15 lt/m ³
Agua corregida a la Arena (Acf)	= Paf x (Aa - Ha) 1.00 lt/m ³
Total Agua Corregida (Atc)	= Acg + Acf 9.15 lt/m ³

PESOS HUMEDOS DE LOS INGREDIENTES POR (m³) DE HORMIGON

Ingrediente	Peso Seco kg/m ³	Peso Húmedo kg/m ³
Cemento	400.48	400.48
Agua	167.00	176.15
Grava	1112.98	1122.72
Arena	708.85	718.77
TOTAL	2389.31	2418.12

PROPORCIONES DE MEZCLA

Cemento	Arena	Gravilla
1.0	1.77	2.78

OBSERVACIONES

- 1.- Las humedades tanto de la grava como de la arena corresponden a las obtenidas en laboratorio debiendo hacer las correcciones adecuadas en obra en el momento del vaciado.
- 2.- La presente dosificación no tendrá efecto en caso de agregados contaminados o sucios, con: Arcillas o finos, materiales orgánicos, residuos de otros materiales, etc. Por lo que se recomienda lavar siempre los áridos antes de utilizarlos.

El método de dosificación empleado en esta investigación fue el método ACI 211.1. Se diseñaron las mezclas con el objetivo de alcanzar una resistencia característica de 250 kg/cm² a los 28 días de edad del hormigón.

Se utilizó un tamaño máximo de agregado grueso de 1 pulgada para los materiales provenientes de San Blas y La Choza, mientras que para el agregado de Tolomosa se empleó un tamaño máximo de 1 ½ pulgadas, considerando que el estudio se aplica a estructuras superficiales. Se adoptó un asentamiento de 2 pulgadas para garantizar una mezcla trabajable y una relación agua/cemento de 0.42, adecuada tanto para hormigones convencionales como para hormigones reforzados con fibras.

3.7 Elaboración de Probetas de Hormigón para la Confirmación de la Resistencia a Compresión.

Esta práctica describe los procedimientos necesarios para elaborar y curar muestras cilíndricas de hormigón, las cuales pueden ser compactadas mediante varillado o vibración, según lo estipulado en la norma ASTM C31: “Práctica estándar para elaborar y curar muestras cilíndricas de hormigón”.

Para la elaboración de las probetas cilíndricas se siguieron los siguientes pasos:

- **Determinación del asentamiento de la mezcla:** Se verificó la trabajabilidad del hormigón antes de su vaciado.
- **Preparación del molde:** Se colocó el molde cilíndrico de 15 cm de diámetro interior y 30 cm de altura sobre una superficie horizontal y estable.
- **Llenado inicial del molde:** Con ayuda de una cuchara, se comenzó a llenar el molde, moviendo el hormigón alrededor de los bordes para asegurar una distribución uniforme y minimizar la segregación.
- **Vaciado en capas:** El molde se llenó en tres capas de igual volumen. En la última capa, se añadió suficiente hormigón para que el molde quedara completamente lleno después de la compactación. Ver anexo II

Figura 3.23

Elaboración de probetas cilíndricas



Fuente: elaboración propia

- Cada capa se compactó con 25 penetraciones utilizando una varilla de 5/8" de diámetro con punta semiesférica, distribuyendo uniformemente las penetraciones a lo largo de toda la capa.
- La capa inferior se compactó en todo su espesor, mientras que la segunda y tercera capa se penetraron aproximadamente 25 mm en la capa inmediatamente inferior.

- Después de compactar cada capa, se golpearon ligeramente los lados del molde 10 veces con un martillo de goma, con el fin de liberar las burbujas de aire atrapadas y nivelar el hormigón.
- Se enrasó el exceso de hormigón con la varilla de compactación para producir una superficie lisa y plana.
- Posteriormente, las muestras fueron transportadas a un ambiente con superficie horizontal para su almacenamiento hasta el día siguiente, momento en que se procedió al desmolde y se sumergieron en la piscina de curado.
- Las probetas se sumergieron completamente en agua hasta la fecha de ensayo, cumpliendo con el curado estándar recomendado por ASTM C31, y fueron ensayadas a compresión a los 7 días de edad del hormigón.

Figura 3.24

Probetas cilíndricas terminadas



Fuente: elaboración propia

3.7.1 Trabajabilidad del Hormigón.

Para evaluar la trabajabilidad del hormigón en estado fresco, se realizó el ensayo de asentamiento, siguiendo lo indicado por la norma (ASTM C143, 2015). Utilizando el cono de Abrams, la aplicación se realizó de la siguiente manera:

a) Medición de la consistencia:

La consistencia de cada preparación de hormigón se mide inmediatamente después de mezclar, mediante el ensayo de asentamiento con el cono de Abrams.

Se utilizó el siguiente equipo:

- Molde metálico galvanizado en forma de tronco de cono, con diámetro superior de 8", diámetro inferior de 4" y altura de 12".
- Regla graduada o flexómetro para medir el asentamiento de la mezcla.
- Varilla de 5/8" de diámetro y 60 cm de longitud para compactar el hormigón.
- Se tomó una muestra representativa de la mezcla y se colocó el molde sobre una superficie plana y no absorbente.
- El molde se llenó en tres capas, compactando cada capa con 25 golpes de varilla distribuidos uniformemente.
- Una vez lleno el molde, este se retiró verticalmente y se midió inmediatamente, mediante la regla, el asentamiento de la mezcla en relación con su altura inicial.

b) Destino del hormigón utilizado:

Todo el hormigón empleado en el ensayo de asentamiento fue devuelto al recipiente de mezcla y, de manera inmediata, se procedió al vaciado en los moldes para la elaboración de las probetas de hormigón.

Tabla 3.28

Asentamiento de microfibra de fibra de vidrio.

Muestra (kg/m ³)	Asentamiento (cm)
0,00	4,8
0,40	4,7
0,70	4,7
1,00	4,6
1,30	4,5

Fuente: elaboración propia

Figura 3.25

Ensayo de asentamiento a las mezclas realizadas



Fuente: elaboración propia

Como se observa en la tabla, la mezcla patrón presentó un asentamiento de 4,8 cm. Se evidencia que la adición de fibras de vidrio reduce la trabajabilidad de la mezcla, ya que los asentamientos disminuyen a medida que aumenta la dosificación de fibra.

Las dosificaciones utilizadas fueron (0,40 - 0,70 - 1,00 y 1,30) kg/m³.

Esto indica que, a mayor contenido de fibras de vidrio, la mezcla de hormigón se vuelve más rígida y menos manejable, afectando su trabajabilidad y facilidad de vaciado y compactación.

3.8 Ensayo de Resistencia a Compresión ASTM C39.

Los ensayos de resistencia a compresión se realizaron siguiendo lo establecido en la norma (ASTM C39/C39M-21, 2021), denominada “Método de prueba estándar de resistencia a compresión de probetas cilíndricas de hormigón”. Para este propósito se emplearon probetas cilíndricas de hormigón de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, elaboradas en moldes metálicos.

Las probetas se ensayaron a los 28 días de curado. A continuación, se describen los pasos realizados durante el ensayo: Ver Anexo III

- Se retiraron las probetas cilíndricas de la piscina de curado, asegurando que se mantuvieran en condiciones de humedad hasta el momento de la prueba.
- Se verificó la perpendicularidad de los cilindros respecto a su eje axial, comprobando además que las superficies extremas no presentaran irregularidades.

- En los extremos de cada cilindro se colocaron discos con almohadillas de neopreno, para garantizar una adecuada transmisión de la carga.
- Posteriormente, las probetas fueron ubicadas en el equipo hidráulico de compresión.
- Se alineó cuidadosamente el eje del cilindro con el centro del equipo, asegurando una transmisión uniforme de la carga.
- Se aplicó la carga de manera continua y controlada, mediante el brazo mecánico del equipo hidráulico, manteniendo una velocidad constante de aplicación.
- Al producirse la falla del cilindro, se registró el valor de la carga máxima soportada.
- Finalmente, con la carga de rotura obtenida y el área transversal del cilindro, se calculó el esfuerzo de compresión correspondiente.

Figura 3.26

Ensayo de resistencia a compresión



Fuente: elaboración propia

Tabla 3.29

Resistencia a compresión de probetas cilíndricas de hormigón Tolomosa
(normas: ASTM C39 - AASHTO T22)

Proyecto:		Proyecto de Ingeniería Civil II			Identif. Muestra:		Ensayo a Compresion		
Procedencia:		Tolomosa (21°34'44.87"S - 64°45'9.47"O)			Laboratorista:		Espino Condori Vekin Galo		
Fecha:		19 de Octubre de 2025							
Nº	Identificación	F. de Vaciado	F. de Rotura	Edad (días)	Area (cm ²)	Lectura (KN)	Carga (Kg)	Resist. (Kg/cm ²)	Resistencia 28d (Kg/cm ²)
1	Probeta 1	21/8/2025	18/9/2025	28	181.458	526.40	53,692.80	295.90	295.90
2	Probeta 2	21/8/2025	18/9/2025	28	181.458	473.70	48,317.40	266.27	266.27
3	Probeta 3	21/8/2025	18/9/2025	28	181.458	497.70	50,765.40	279.76	279.76
4	Probeta 4	21/8/2025	18/9/2025	28	181.458	537.90	54,865.80	302.36	302.36
PROMEDIO									286.07
Observaciones:									
1. La realización del muestreo, el curado de probetas y los datos técnicos son responsabilidad del solicitante.									

Fuente: elaboración propia

Tabla 3.30

Resistencia a compresión de probetas cilíndricas de hormigón San Blas
(normas: ASTM C39 - AASHTO T22)

Proyecto:		Proyecto de Ingeniería Civil II		Identif. Muestra:		Ensayo a Compresion			
Procedencia:		San Blas (21°34'49.40"S - 64°42'14.59"O)		Laboratorista:		Espino Condori Vekin Galo			
Fecha:		19 de Octubre de 2025							

Nº	Identificación	F. de Vaciado	F. de Rotura	Edad (días)	Area (cm ²)	Lectura (KN)	Carga (Kg)	Resist. (Kg/cm ²)	Resistencia 28d (Kg/cm ²)
1	Probeta 1	21/8/2025	18/9/2025	28	181.458	505.90	51,601.80	284.37	284.37
2	Probeta 2	21/8/2025	18/9/2025	28	181.458	457.90	46,705.80	257.39	257.39
3	Probeta 3	21/8/2025	18/9/2025	28	181.458	501.23	51,125.46	281.75	281.75
4	Probeta 4	21/8/2025	18/9/2025	28	181.458	509.00	51,918.00	286.12	286.12
PROMEDIO									277.41

Observaciones:									
1. La realización del muestreo, el curado de probetas y los datos técnicos son responsabilidad del solicitante.									

Fuente: elaboración propia

Tabla 3.31

Resistencia a compresión de probetas cilíndricas de hormigón La Choza
(normas: ASTM C39 - AASHTO T22)

Proyecto:		Proyecto de Ingeniería Civil II			Identif. Muestra:		Ensayo a Compresion		
Procedencia:		La Choza (21°40'55.51"S - 64°36'48.81"O)			Laboratorista:		Espino Condori Vekin Galo		
Fecha:		19 de Octubre de 2025							

N°	Identificación	F. de Vaciado	F. de Rotura	Edad (días)	Area (cm ²)	Lectura (KN)	Carga (Kg)	Resist. (Kg/cm ²)	Resistencia 28d (Kg/cm ²)
1	Probeta 1	21/8/2025	18/9/2025	28	183.854	576.00	58,752.00	319.56	319.56
2	Probeta 2	21/8/2025	18/9/2025	28	181.458	596.70	60,863.40	335.41	335.41
3	Probeta 3	21/8/2025	18/9/2025	28	181.458	521.50	53,193.00	293.14	293.14
4	Probeta 4	21/8/2025	18/9/2025	28	181.458	572.60	58,405.20	321.87	321.87

PROMEDIO								317.49
----------	--	--	--	--	--	--	--	---------------

Observaciones:									
1. La realización del muestreo, el curado de probetas y los datos técnicos son responsabilidad del solicitante.									

Fuente: elaboración propia

3.9 Elaboración, Curado y Ruptura de los Especímenes de Hormigón a Flexión.

Para la elaboración de los especímenes de hormigón a flexión, se realizó el pesado de los componentes (agregado grueso, agregado fino, cemento y agua), de acuerdo con las proporciones indicadas en la dosificación. Ver Anexo II

Figura 3.27

Hormigoneras listas para empezar el mezclado



Fuente: elaboración propia

Secuencia en el mezclado.

- a) Se preparó la mezcladora, verificando que estuviera limpia y en condiciones adecuadas para el uso.
- b) Los moldes prismáticos fueron armados y recubiertos en su interior con aceite quemado aplicado con brocha, con el fin de facilitar el desencofrado posterior.
- c) Se pesaron los agregados en estado húmedo y se realizó la corrección correspondiente por humedad. Asimismo, se pesó el cemento y se midió la cantidad de agua necesaria en peso.
- d) En la mezcladora se colocó primero el agregado grueso, luego el agregado fino; se inició el mezclado y, de forma gradual, se fue incorporando parte del agua. Posteriormente, se añadió el cemento junto con el resto del agua hasta obtener una mezcla homogénea.
- e) La trabajabilidad del hormigón se evaluó mediante el ensayo de asentamiento con el cono de Abrams.
- f) La mezcla fue trasladada desde la mezcladora hasta una carretilla y, con ayuda de una pala, se procedió a llenar los moldes prismáticos (vigas). El llenado se realizó en tercios, compactando cada capa mediante apisonado para evitar la formación de vacíos, y finalmente se enrasó la superficie.
- g) Los especímenes fueron dejados en reposo durante 24 horas para el fraguado inicial. Posteriormente, se desencofraron y se sumergieron en agua para su curado durante 28 días.

Para el hormigón reforzado se siguió la misma secuencia de pasos, con la inclusión de microfibras.

La incorporación de las microfibras se efectuó de manera cuidadosa, a fin de garantizar su adecuada dispersión dentro de la mezcla.

En total, se elaboraron 60 vigas, distribuidas entre los distintos tipos de hormigón a comparar.

Figura 3.28

Vaciado de las vigas y curado



Fuente: elaboración propia

3.10 Ensayo en el Hormigón Endurecido.

3.10.1 Resistencia a Tracción de Vigas de Hormigón.

Este método de ensayo consiste en determinar el esfuerzo a tracción del hormigón mediante la aplicación de carga en los tercios medios de una viga simple. Los resultados obtenidos se expresan y reportan como el módulo de ruptura (f_r).

El valor del esfuerzo determinado puede verse afectado por distintos factores, tales como: el tamaño del espécimen, las condiciones de preparación, el estado de humedad, el proceso de curado o si la viga fue moldeada originalmente o cortada a un tamaño específico.

Los resultados de este método de ensayo pueden emplearse para:

- Verificar el cumplimiento de especificaciones técnicas.
- Servir como base para la dosificación de mezclas de hormigón.
- Evaluar procedimientos de mezclado, colocación y curado.

Este ensayo es de aplicación común en hormigones utilizados en losas y pavimentos, donde la resistencia a tracción indirecta es un parámetro fundamental para el desempeño estructural. Ver Anexo III

Figura 3.29

Equipo utilizado



Fuente: elaboración propia

- a) Se registró el peso de cada viga de hormigón antes del ensayo.
- b) Se colocó la viga en el equipo de ruptura a flexión, alineándola correctamente para garantizar que la carga se transmitiera de manera uniforme sobre los apoyos y en los puntos de aplicación.
- c) Se verificó que la distancia entre apoyos y los puntos de carga correspondiera a la configuración de carga en tercios medios establecida por la norma.
- d) Se aplicó la carga de manera continua y uniforme hasta producir la falla de la viga.
- e) Una vez ocurrida la rotura, se registró la carga máxima aplicada al espécimen.
- f) Con el valor de la carga de ruptura y las dimensiones de la viga, se procedió al cálculo del módulo de ruptura (f_r).

Figura 3.30

Prensa hidráulica



Fuente: elaboración propia

Figura 3.31

Rotura de las vigas



Fuente: elaboración propia

Figura 3.32

Vigas después del ensayo de atracción



Fuente: elaboración propia

3.11 Valores de Resistencia a Tracción Obtenidos

Tabla 3.32

Resultados obtenidos de Resistencia a tracción agregado TOL-CV

Nº	Identificación	F. de Vaciado	F. de Rotura	Edad (días)	Dim "a" (cm)	Carga "F" (KN)	Carga "F" (Kg)	Resist. f_{ctf} (Kg/cm ²)	Resist. f_{ct} (Kg/cm ²)	Resistencia 28d (Kg/cm ²)
1	V1-TOL-CV	3/9/2025	1/10/2025	28	15	16.20	1652.40	22.03	11.02	22.03
2	V2-TOL-CV	3/9/2025	1/10/2025	28	15	12.30	1254.60	16.73	8.36	16.73
3	V3-TOL-CV	3/9/2025	1/10/2025	28	15	15.70	1601.40	21.35	10.68	21.35
4	V4-TOL-CV	3/9/2025	1/10/2025	28	15	15.20	1550.40	20.67	10.34	20.67
PROMEDIO										20.20

Fuente: elaboración propia

Tabla 3.33

Resultados obtenidos de Resistencia a tracción agregado SBL-CV

Nº	Identificación	F. de Vaciado	F. de Rotura	Edad (días)	Dim "a" (cm)	Carga "F" (KN)	Carga "F" (Kg)	Resist. f_{ctf} (Kg/cm ²)	Resist. f_{ct} (Kg/cm ²)	Resistencia 28d (Kg/cm ²)
1	V1-SBL-CV	28/8/2025	25/9/2025	28	15	16.80	1713.60	22.85	11.42	22.85
2	V2-SBL-CV	28/8/2025	25/9/2025	28	15	15.90	1621.80	21.62	10.81	21.62
3	V3-SBL-CV	28/8/2025	25/9/2025	28	15	14.30	1458.60	19.45	9.72	19.45
4	V4-SBL-CV	28/8/2025	25/9/2025	28	15	15.60	1591.20	21.22	10.61	21.22
PROMEDIO										21.28

Fuente: elaboración propia

Tabla 3.34

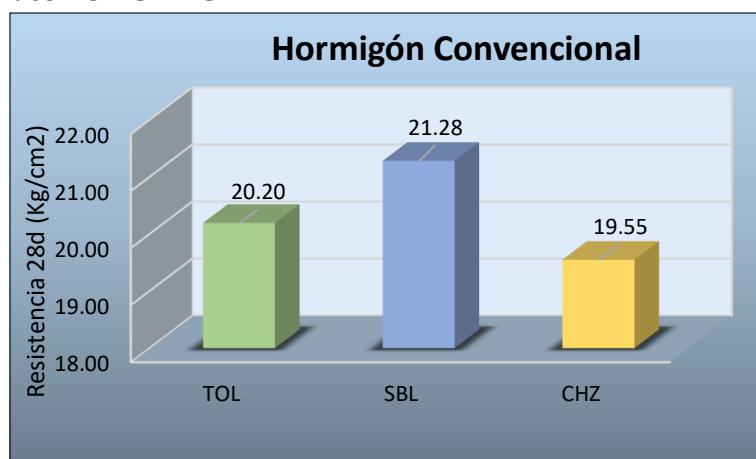
Resultados obtenidos de Resistencia a tracción agregado CHZ-CV

Nº	Identificación	F. de Vaciado	F. de Rotura	Edad (días)	Dim "a" (cm)	Carga "F" (KN)	Carga "F" (Kg)	Resist. f_{ctf} (Kg/cm ²)	Resist. f_{ct} (Kg/cm ²)	Resistencia 28d (Kg/cm ²)
1	V1-CHZL-CV	28/8/2025	25/9/2025	28	15	12.80	1305.60	17.41	8.70	17.41
2	V2-CHZ-CV	28/8/2025	25/9/2025	28	15	14.10	1438.20	19.18	9.59	19.18
3	V3-CHZ-CV	28/8/2025	25/9/2025	28	15	15.70	1601.40	21.35	10.68	21.35
4	V4-CHZ-CV	28/8/2025	25/9/2025	28	15	14.90	1519.80	20.26	10.13	20.26
PROMEDIO										19.55

Fuente: elaboración propia

Figura 3.33

Diagramas de barras de los valores de resistencia a tracción de vigas obtenidos TOL-SBL-CHZ



Fuente: elaboración propia

Tabla 3.35*Resultados obtenidos de Resistencia a tracción agregado TOL-0.40 kg/m³*

Nº	Identificación (kg/m ³)	F. de Vaciado	F. de Rotura	Edad (días)	Dim "a" (cm)	Carga "F" (KN)	Carga "F" (Kg)	Resist. f _{ctf} (Kg/cm ²)	Resist.f _{ct} (Kg/cm ²)	Resistencia 28d (Kg/cm ²)
1	V1-TOL-0.40	3/9/2025	1/10/2025	28	15	18.40	1876.80	25.02	12.51	25.02
2	V2-TOL-0.40	3/9/2025	1/10/2025	28	15	15.20	1550.40	20.67	10.34	20.67
3	V3-TOL-0.40	3/9/2025	1/10/2025	28	15	17.00	1734.00	23.12	11.56	23.12
4	V4-TOL-0.40	3/9/2025	1/10/2025	28	15	14.20	1448.40	19.31	9.66	19.31
PROMEDIO										22.03

Fuente: elaboración propia

Tabla 3.36*Resultados obtenidos de Resistencia a tracción agregado SBL-0.40 kg/m³*

Nº	Identificación (kg/m ³)	F. de Vaciado	F. de Rotura	Edad (días)	Dim "a" (cm)	Carga "F" (KN)	Carga "F" (Kg)	Resist. f _{ctf} (Kg/cm ²)	Resist.f _{ct} (Kg/cm ²)	Resistencia 28d (Kg/cm ²)
1	V1-SBL-0.40	28/8/2025	25/9/2025	28	15	14.70	1499.40	19.99	10.00	19.99
2	V2-SBL-0.40	28/8/2025	25/9/2025	28	15	16.90	1723.80	22.98	11.49	22.98
3	V3-SBL-0.40	28/8/2025	25/9/2025	28	15	16.60	1693.20	22.58	11.29	22.58
4	V4-SBL-0.40	28/8/2025	25/9/2025	28	15	17.10	1744.20	23.26	11.63	23.26
PROMEDIO										22.20

Fuente: elaboración propia

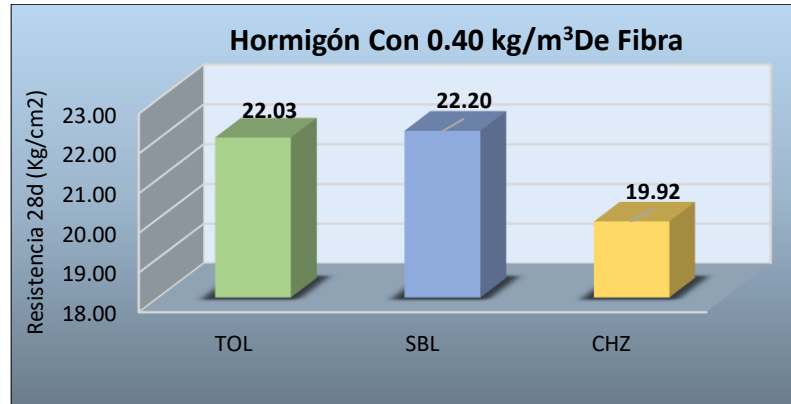
Tabla 3.37*Resultados obtenidos de Resistencia a tracción agregado CHZ-0.40 kg/m³*

Nº	Identificación (kg/m ³)	F. de Vaciado	F. de Rotura	Edad (días)	Dim "a" (cm)	Carga "F" (KN)	Carga "F" (Kg)	Resist. f _{ctf} (Kg/cm ²)	Resist.f _{ct} (Kg/cm ²)	Resistencia 28d (Kg/cm ²)
1	V1-CHZ-0.40	28/8/2025	25/9/2025	28	15	14.90	1519.80	20.26	10.13	20.26
2	V2-CHZ-0.40	28/8/2025	25/9/2025	28	15	13.20	1346.40	17.95	8.98	17.95
3	V3-CHZ-0.40	28/8/2025	25/9/2025	28	15	16.10	1642.20	21.90	10.95	21.90
4	V4-CHZ-0.40	28/8/2025	25/9/2025	28	15	14.40	1468.80	19.58	9.79	19.58
PROMEDIO										19.92

Fuente: elaboración propia

Figura 3.34

Diagramas de barras de los valores de resistencia a tracción de vigas obtenidos TOL-SBL-CHZ



Fuente: elaboración propia

Tabla 3.38

Resultados obtenidos de Resistencia a tracción agregado TOL-0.70 kg/m³

Nº	Identificación (kg/m³)	F. de Vaciado	F. de Rotura	Edad (días)	Dim "a" (cm)	Carga "F" (KN)	Carga "F" (Kg)	Resist. f_{ctf} (Kg/cm²)	Resist. f_{ct} (Kg/cm²)	Resistencia 28d (Kg/cm²)
1	V1-TOL-0.70	4/9/2025	2/10/2025	28	15	14.30	1458.60	19.45	9.72	19.45
2	V2-TOL-0.70	4/9/2025	2/10/2025	28	15	16.10	1642.20	21.90	10.95	21.90
3	V3-TOL-0.70	4/9/2025	2/10/2025	28	15	15.20	1550.40	20.67	10.34	20.67
4	V4-TOL-0.70	4/9/2025	2/10/2025	28	15	19.50	1989.00	26.52	13.26	26.52
PROMEDIO										22.13

Fuente: elaboración propia

Tabla 3.39

Resultados obtenidos de Resistencia a tracción agregado SBL-0.70 kg/m³

Nº	Identificación (kg/m³)	F. de Vaciado	F. de Rotura	Edad (días)	Dim "a" (cm)	Carga "F" (KN)	Carga "F" (Kg)	Resist. f_{ctf} (Kg/cm²)	Resist. f_{ct} (Kg/cm²)	Resistencia 28d (Kg/cm²)
1	V1-SBL-0.70	1/9/2025	29/9/2025	28	15	18.80	1917.60	25.57	12.78	25.57
2	V2-SBL-0.70	1/9/2025	29/9/2025	28	15	18.10	1846.20	24.62	12.31	24.62
3	V3-SBL-0.70	1/9/2025	29/9/2025	28	15	19.30	1968.60	26.25	13.12	26.25
4	V4-SBL-0.70	1/9/2025	29/9/2025	28	15	15.90	1621.80	21.62	10.81	21.62
PROMEDIO										24.51

Fuente: elaboración propia

Tabla 3.40

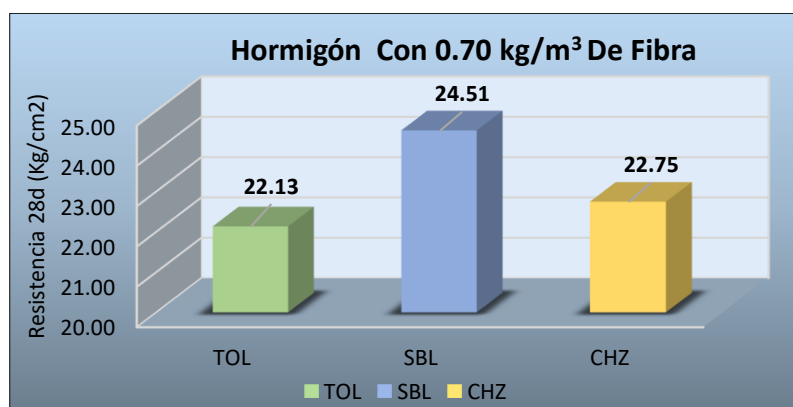
Resultados obtenidos de Resistencia a tracción agregado CHZ-0.70 kg/m³

Nº	Identificación (kg/m ³)	F. de Vaciado	F. de Rotura	Edad (días)	Dim "a" (cm)	Carga "F" (KN)	Carga "F" (Kg)	Resist. f_{ctf} (Kg/cm ²)	Resist. f_{ct} (Kg/cm ²)	Resistencia 28d (Kg/cm ²)
1	V1-CHZ-0.70	1/9/2025	29/9/2025	28	15	14.50	1479.00	19.72	9.86	19.72
2	V2-CHZ-0.70	1/9/2025	29/9/2025	28	15	16.70	1703.40	22.71	11.36	22.71
3	V3-CHZ-0.70	1/9/2025	29/9/2025	28	15	20.40	2080.80	27.74	13.87	27.74
4	V4-CHZ-0.70	1/9/2025	29/9/2025	28	15	15.30	1560.60	20.81	10.40	20.81
PROMEDIO										22.75

Fuente: elaboración propia

Figura 3.35

Diagramas de barras de los valores de resistencia a tracción de vigas obtenidos TOL-SBL-CHZ.



Fuente: elaboración propia

Tabla 3.41

Resultados obtenidos de Resistencia a tracción agregado TOL - 1.00 kg/m³

Nº	Identificación (kg/m ³)	F. de Vaciado	F. de Rotura	Edad (días)	Dim "a" (cm)	Carga "F" (KN)	Carga "F" (Kg)	Resist. f_{ctf} (Kg/cm ²)	Resist. f_{ct} (Kg/cm ²)	Resistencia 28d (Kg/cm ²)
1	V1-TOL-1.00	1/9/2025	29/9/2025	28	15	15.20	1550.40	20.67	10.34	20.67
2	V2-TOL-1.00	1/9/2025	29/9/2025	28	15	22.30	2274.60	30.33	15.16	30.33
3	V3-TOL-1.00	1/9/2025	29/9/2025	28	15	16.70	1703.40	22.71	11.36	22.71
4	V4-TOL-1.00	1/9/2025	29/9/2025	28	15	16.30	1662.60	22.17	11.08	22.17
PROMEDIO										23.97

Fuente: elaboración propia

Tabla 3.42

Resultados obtenidos de Resistencia a tracción agregado SBL-1.00 kg/m³

Nº	Identificación (kg/m ³)	F. de Vaciado	F. de Rotura	Edad (días)	Dim "a" (cm)	Carga "F" (KN)	Carga "F" (Kg)	Resist. f _{ctf} (Kg/cm ²)	Resist.f _{ct} (Kg/cm ²)	Resistencia 28d (Kg/cm ²)
1	V1-SBL-1.00	1/9/2025	29/9/2025	28	15	20.60	2101.20	28.02	14.01	28.02
2	V2-SBL-1.00	1/9/2025	29/9/2025	28	15	21.50	2193.00	29.24	14.62	29.24
3	V3-SBL-1.00	1/9/2025	29/9/2025	28	15	21.20	2162.40	28.83	14.42	28.83
4	V4-SBL-1.00	1/9/2025	29/9/2025	28	15	19.30	1968.60	26.25	13.12	26.25
PROMEDIO										28.08

Fuente: elaboración propia

Tabla 3.43

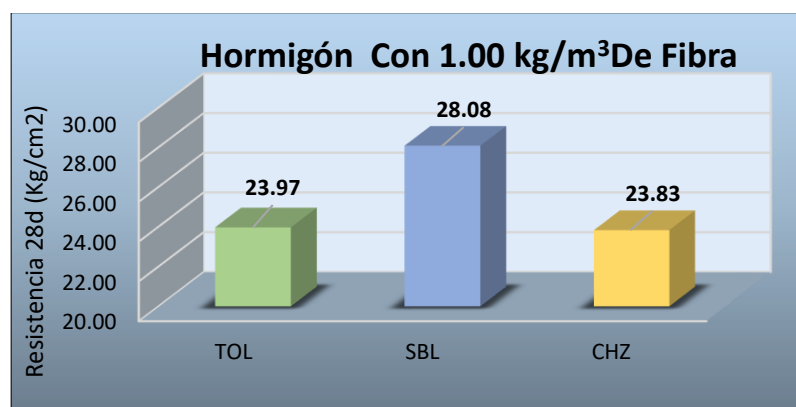
Resultados obtenidos de Resistencia a tracción agregado CHZ-1.00 kg/m³

Nº	Identificación (kg/m ³)	F. de Vaciado	F. de Rotura	Edad (días)	Dim "a" (cm)	Carga "F" (KN)	Carga "F" (Kg)	Resist. f _{ctf} (Kg/cm ²)	Resist.f _{ct} (Kg/cm ²)	Resistencia 28d (Kg/cm ²)
1	V1-CHZ-1.00	1/9/2025	29/9/2025	28	15	16.70	1703.40	22.71	11.36	22.71
2	V2-CHZ-1.00	1/9/2025	29/9/2025	28	15	20.70	2111.40	28.15	14.08	28.15
3	V3-CHZ-1.00	1/9/2025	29/9/2025	28	15	16.90	1723.80	22.98	11.49	22.98
4	V4-CHZ-1.00	1/9/2025	29/9/2025	28	15	15.80	1611.60	21.49	10.74	21.49
PROMEDIO										23.83

Fuente: elaboración propia

Figura 3.36

Diagramas de barras de los valores de resistencia a tracción de vigas obtenidos TOL-SBL-CHZ.



Fuente: elaboración propia

Tabla 3.44*Resultados obtenidos de Resistencia a tracción agregado TOL-1.30 kg/m³*

Nº	Identificación (kg/m ³)	F. de Vaciado	F. de Rotura	Edad (días)	Dim "a" (cm)	Carga "F" (KN)	Carga "F" (Kg)	Resist. f _{ctf} (Kg/cm ²)	Resist.f _{ct} (Kg/cm ²)	Resistencia 28d (Kg/cm ²)
1	V1-TOL-1.30	3/9/2025	1/10/2025	28	15	18.00	1836.00	24.48	12.24	24.48
2	V2-TOL-1.30	3/9/2025	1/10/2025	28	15	21.60	2203.20	29.38	14.69	29.38
3	V3-TOL-1.30	3/9/2025	1/10/2025	28	15	20.50	2091.00	27.88	13.94	27.88
4	V4-TOL-1.30	3/9/2025	1/10/2025	28	15	18.50	1887.00	25.16	12.58	25.16
PROMEDIO										26.72

Fuente: elaboración propia

Tabla 3.45*Resultados obtenidos de Resistencia a tracción agregado SBL-1.30 kg/m³*

Nº	Identificación (kg/m ³)	F. de Vaciado	F. de Rotura	Edad (días)	Dim "a" (cm)	Carga "F" (KN)	Carga "F" (Kg)	Resist. f _{ctf} (Kg/cm ²)	Resist.f _{ct} (Kg/cm ²)	Resistencia 28d (Kg/cm ²)
1	V1-SBL-1.30	3/9/2025	1/10/2025	28	15	35.20	3590.40	47.87	23.94	47.87
2	V2-SBL-1.30	3/9/2025	1/10/2025	28	15	22.20	2264.40	30.19	15.10	30.19
3	V3-SBL-1.30	3/9/2025	1/10/2025	28	15	25.40	2590.80	34.54	17.27	34.54
4	V4-SBL-1.30	3/9/2025	1/10/2025	28	15	24.90	2539.80	33.86	16.93	33.86
PROMEDIO										36.62

Fuente: elaboración propia

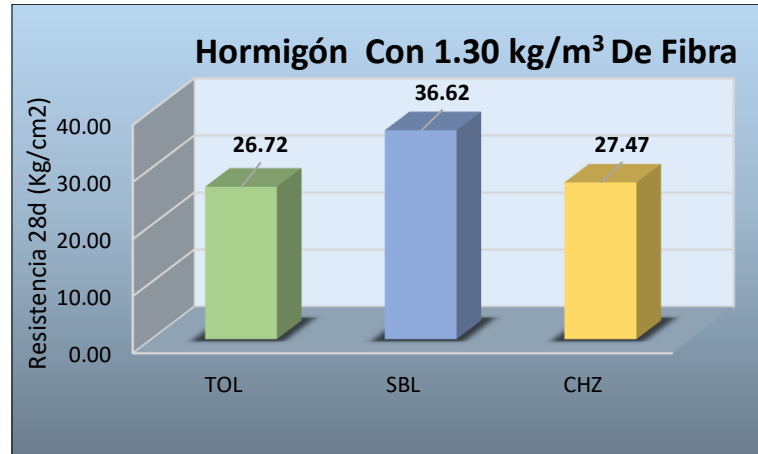
Tabla 3.46*Resultados obtenidos de Resistencia a tracción agregado CHZ-1.30 kg/m³*

Nº	Identificación (kg/m ³)	F. de Vaciado	F. de Rotura	Edad (días)	Dim "a" (cm)	Carga "F" (KN)	Carga "F" (Kg)	Resist. f _{ctf} (Kg/cm ²)	Resist.f _{ct} (Kg/cm ²)	Resistencia 28d (Kg/cm ²)
1	V1-CHZ-1.30	3/9/2025	1/10/2025	28	15	20.60	2101.20	28.02	14.01	28.02
2	V2-CHZ-1.30	3/9/2025	1/10/2025	28	15	19.90	2029.80	27.06	13.53	27.06
3	V3-CHZ-1.30	3/9/2025	1/10/2025	28	15	22.20	2264.40	30.19	15.10	30.19
4	V4-CHZ-1.30	3/9/2025	1/10/2025	28	15	18.10	1846.20	24.62	12.31	24.62
PROMEDIO										27.47

Fuente: elaboración propia

Figura 3.37

Diagramas de barras de los valores de resistencia a tracción de vigas obtenidos TOL-SBL-CHZ



Fuente: elaboración propia

3.11.1 Resumen de las Resistencias a Tracción Obtenidas.

Tabla 3.47

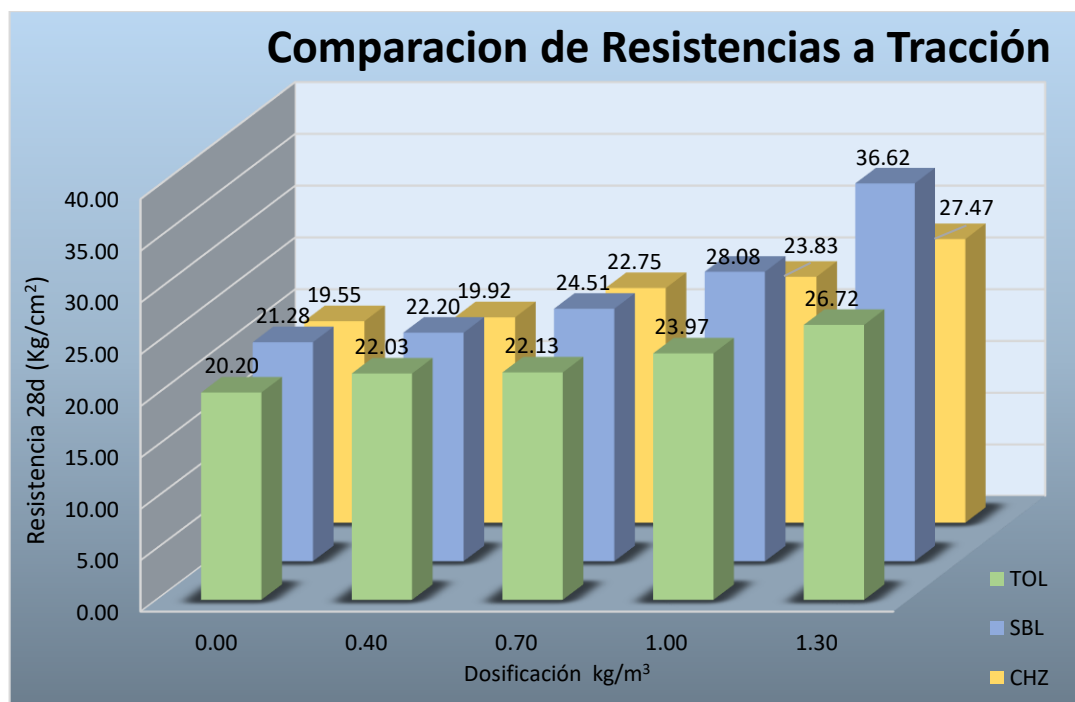
Resultados obtenidos de resistencia a tracción de las vigas

Fibras (kg/m³)	Edad Del Hormigón (días)	Resistencia a Tracción (Kg/cm²)		
		TOL	SBL	CHZ
0.00	28	20.20	21.28	19.55
0.40	28	22.03	22.20	19.92
0.70	28	22.13	24.51	22.75
1.00	28	23.97	28.08	23.83
1.30	28	26.72	36.62	27.47

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.38

Comparación de resistencias a tracción de vigas a los 28 días



Fuente: Elaboración propia

3.12 Ensayo de Retracción Plástica ASTM C1579.

El presente ensayo se emplea para comparar la fisuración superficial en paneles de hormigón reforzado con fibras frente a la fisuración en paneles de control (hormigón sin fibras), sometidos a condiciones de restricción y pérdida de humedad suficientemente severas como para inducir agrietamiento.

La norma ASTM C1579 establece el “Método de prueba estándar para la evaluación del agrietamiento por retracción plástica restringida del hormigón reforzado con fibras”.

Este procedimiento consiste en la preparación de dos paneles de ensayo:

- Uno de hormigón patrón (con o sin fibras, según la investigación).
- Otro de hormigón con fibras incorporadas.

El objetivo es comparar el comportamiento de ambos paneles frente al agrietamiento por retracción plástica. Los paneles son elaborados siguiendo una guía

preestablecida y expuestos a condiciones controladas de secado diseñadas para inducir agrietamiento en el hormigón patrón.

- Una evaporación de $1,0 \text{ kg/m}^2\cdot\text{h}$ desde el recipiente de agua debe alcanzarse para que el ensayo sea válido.
- La pérdida de humedad en los paneles de hormigón también puede medirse y reportarse, aunque la velocidad de evaporación del agua en el recipiente es el parámetro principal para cuantificar las condiciones de secado.

El ensayo finaliza al momento en que el hormigón alcanza el fin de fraguado. Sin embargo, a las 24 horas del inicio del mezclado se determina el espesor promedio de las fisuras desarrolladas.

Este método busca controlar las variables atmosféricas para obtener un parámetro confiable que refleje el comportamiento relativo de una mezcla de hormigón fresco.

Es importante señalar que otros factores también influyen en la fisuración por retracción plástica, tales como:

- La finura del cemento.
- La granulometría de los agregados.
- El procedimiento de mezclado.
- El asentamiento de cono.
- El contenido de aire.
- La temperatura del hormigón.
- El acabado de la superficie.

Por lo tanto, se recomienda mantener estas variables lo más constantes posible entre mezclas para asegurar resultados comparables.

Finalmente, para el análisis de las fisuras en el hormigón, se procederá de la siguiente manera:

3.12.1 Material y Equipo Necesario para el Desarrollo del Método.

Moldes: - Para la confección de los paneles utilizados en el ensayo de fisuración se emplearon moldes cuyas dimensiones se muestran en la Figura N° 3.28. Estos moldes fueron construidos en acero inoxidable; no obstante, la norma permite también el uso de materiales alternativos como madera o plástico.

Los moldes empleados presentan una forma rectangular con dimensiones de 355 mm x 560 mm y una profundidad de 120 mm. Esta profundidad cumple con lo establecido por la norma, que exige un mínimo de 65 mm más dos veces el tamaño máximo del agregado grueso. En esta investigación, dado que el tamaño máximo del agregado utilizado fue de 1" (25,4 mm), el molde se fabricó en chapa metálica, garantizando resistencia y durabilidad durante su uso. Ver Anexo IV

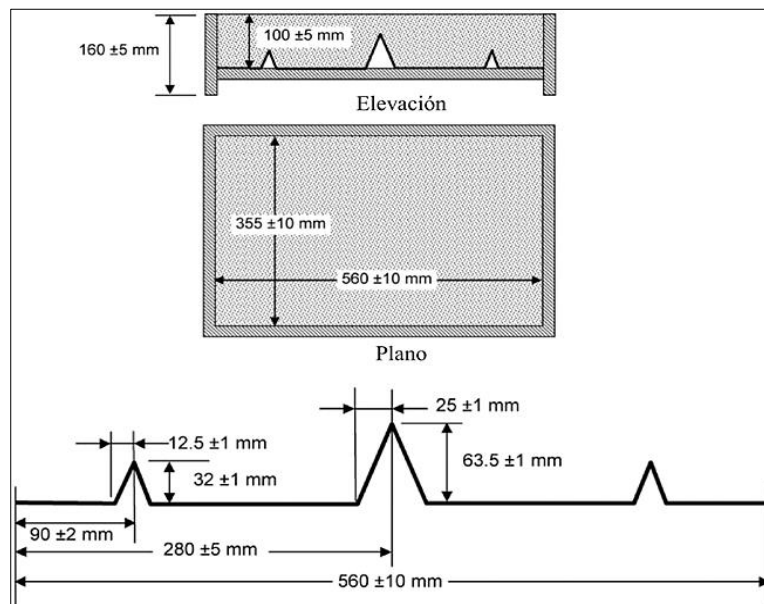
3.12.2 Restricciones Internas e Inductor de Grietas

Las restricciones internas y el inductor de tensión también fueron fabricados en chapa metálica, de acuerdo con lo ilustrado en la Figura N° 3.39. Las dos restricciones internas, de 32 mm de altura, se colocaron a una distancia de 90 mm hacia el interior desde cada extremo del molde.

El inductor de tensión central, con una altura de 64 mm, actúa como punto de iniciación para la formación de fisuras durante el ensayo. Tanto el inductor de tensión como las restricciones internas se encuentran unidos a la parte inferior del molde, de manera que aseguran las condiciones necesarias para el desarrollo controlado del agrietamiento.

Figura 3.39

Dimensiones de los moldes y restricciones geométricas



Fuente: ASTM C1579

Figura 3.40

Moldes para la realización del ensayo



Fuente: Elaboración propia

Uso de aceite desmoldante

Para facilitar el retiro del hormigón una vez fraguado y evitar adherencias indeseadas, se aplicó aceite desmoldante en la base y en los laterales de los moldes. El procedimiento se consideró correcto cuando toda la superficie quedó uniformemente cubierta con una fina capa de aceite y el exceso fue retirado con un trapo limpio y seco, garantizando así que no se alteraran las propiedades del hormigón en contacto con el molde.

Figura 3.41

Aplicación de aceite sobre el molde antes del vaciado del concreto



Fuente: Elaboración propia

Aparatos para generar condiciones medioambientales

Con el fin de reproducir las condiciones ambientales necesarias para el ensayo de fisuración por retracción plástica, se utilizaron los siguientes equipos:

- **Ventilador:** El equipo empleado fue un ventilador eléctrico de velocidad variable, con un diámetro de 50 cm. Este es capaz de alcanzar una velocidad de viento superior a 4,7 m/s en toda la superficie de los paneles de prueba, en concordancia con lo especificado en la norma.
- **Calentador:** Se utilizó un calentador a gas de intensidad regulable, lo que permitió controlar la temperatura y mantener dentro del rango adecuado la humedad relativa del ambiente. De esta manera, se logró reproducir las condiciones ambientales críticas que influyen en el proceso de formación de fisuras en el hormigón fresco.

Figura 3.42

Aparatos para generar condiciones medioambientales



Fuente: Elaboración propia

Cámara ambientada.

Para garantizar condiciones de ensayo controladas y reproducibles, se construyó una cámara ambientada con las siguientes características:

Dimensiones: La cámara presenta 1,0 m de altura y 1,20 m de largo y ancho.

Estructura: El esqueleto fue fabricado con fierro angular, brindando resistencia y estabilidad.

Revestimiento:

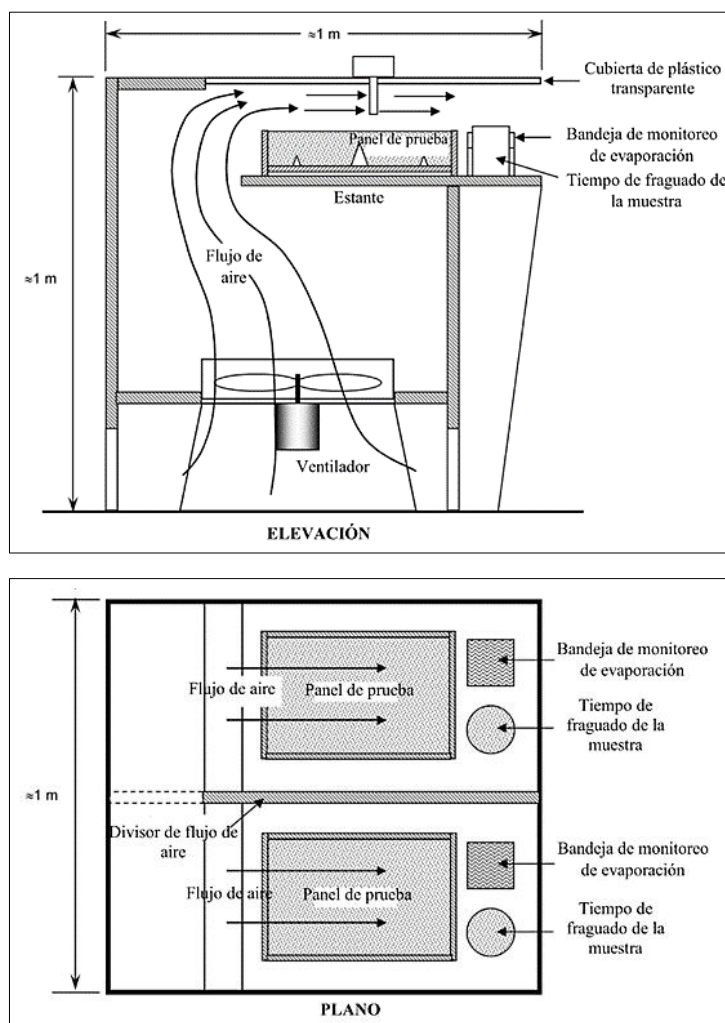
- **Paredes:** Se cubrieron con tableros de trupan, material rígido de textura lisa que proporciona un acabado uniforme.
- **Base:** Se utilizó madera aglomerada para apoyar de manera estable los moldes durante el ensayo.
- **Parte superior:** Se colocó vidrio transparente, lo que permitió la visualización

directa del proceso de fisuración en los paneles de hormigón sin alterar las condiciones internas.

En el interior de la cámara se instaló el calentador a gas en la parte posterior del ventilador eléctrico, de modo que el ventilador absorbiera el aire caliente generado por el calentador y lo impulsara en forma de flujo de aire caliente uniforme hacia los paneles. Este diseño permitió simular las condiciones de secado severo necesarias para inducir la retracción plástica y la consecuente formación de fisuras en el hormigón.

Figura 3.43

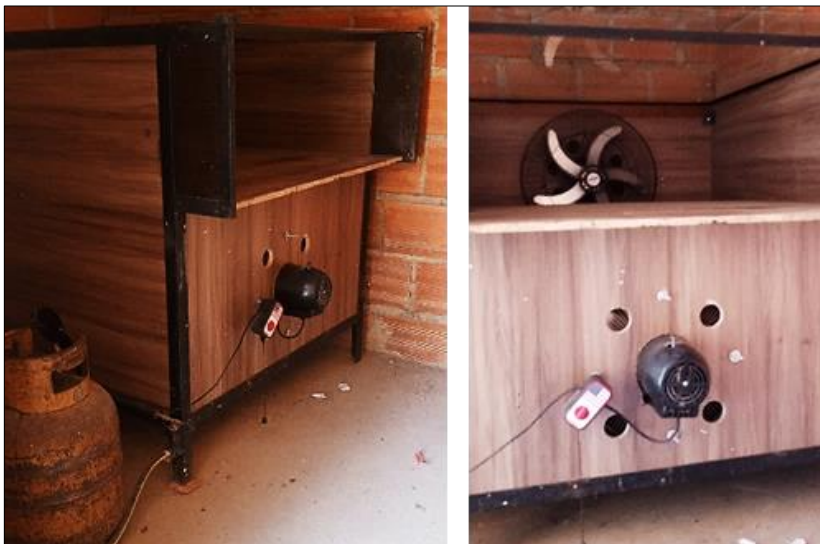
Caja de ventilador para mantener las condiciones ambientales (Sin escala)



Fuente: ASTM C1579

Figura 3.44

Cámara ambiental (control de temperatura y humedad) utilizada para el ensayo



Fuente: Elaboración propia

Fuente de Monitoreo

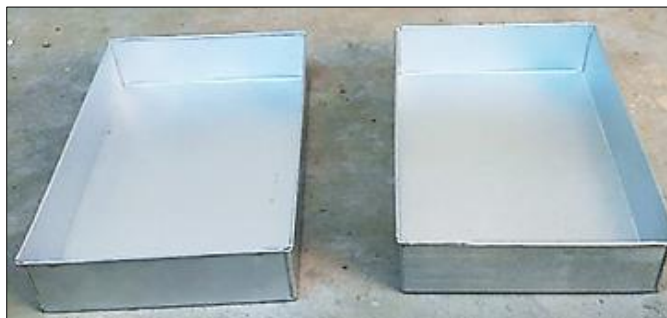
Para el correcto desarrollo del ensayo de retracción plástica ASTM C1579, se requiere una fuente de monitoreo adecuada que permita exponer el agua a la corriente de aire que incide sobre cada panel de prueba de hormigón.

Dimensiones: La fuente debe ser lo suficientemente grande para exponer un área de al menos $0,1 \pm 0,01 \text{ m}^2$ de agua a la acción del flujo de aire.

Altura del labio: El borde expuesto de la fuente no debe superar los 5 mm por encima del nivel inicial del agua, garantizando así que la medición de la evaporación sea consistente y controlada desde el inicio del ensayo. Este procedimiento asegura que la velocidad de evaporación del agua pueda ser monitoreada y estandarizada, tal como lo establece la norma ASTM C1579, para cuantificar correctamente las condiciones ambientales y el comportamiento del hormigón frente a la fisuración por retracción plástica.

Figura 3.45

Fuente para determinar la tasa de evaporación



Fuente: Elaboración propia

Comparador de fisuras.

Para la cuantificación del ancho de fisuras en las losas ensayadas se empleó una regla comparadora de fisuras SIKA, un dispositivo óptico portátil diseñado para mediciones directas en superficies de hormigón. El equipo cuenta con una escala de alta precisión, con intervalos graduales que permiten determinar aperturas desde 0.03 mm, lo que supera la exigencia mínima establecida por la ASTM C1579, que requiere instrumentos con capacidad de lectura hasta 0.05 mm.

3.12.3 Registro de Datos de la Cámara Ambiental

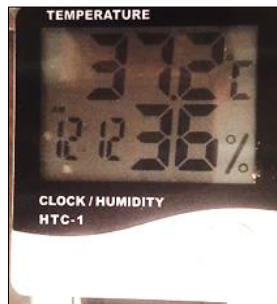
Durante el ensayo, se registraron de manera sistemática las condiciones ambientales dentro de la cámara de pruebas. Para ello:

- Se midió la temperatura ambiente utilizando un Higrómetro.
- Se determinó la humedad mediante un higrómetro calibrado.
- Se registró la velocidad del viento en el área de los paneles de hormigón utilizando un anemómetro.

Estos registros permitieron asegurar que las condiciones ambientales se mantuvieran controladas y consistentes, tal como exige la norma ASTM C1579, garantizando así la confiabilidad de los resultados obtenidos en los ensayos de fisuración por retracción plástica. Ver Anexo V

Figura 3.46

Higrómetro que registra la humedad y la temperatura ambiente



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.47

Anemómetro que registra la velocidad del viento y la temperatura del ambiente



Fuente: Elaboración propia

Procedimiento del ensayo.

Los pasos para realizar el ensayo de retracción plástica son los siguientes:

1. se cubre la base y las paredes de los moldes metálicos con aceite desmoldante, con el fin de reducir la adherencia entre el molde y el hormigón.

Figura 3.48

Aplicación de aceite sobre el molde antes del vaciado del concreto



Fuente: Elaboración propia

2. Se determina el asentamiento de cada mezcla conforme al método de prueba

con cono de Abrams. Si el asentamiento es demasiado bajo para una mezcla que contiene fibras, se utiliza el tiempo de flujo a través de un cono de asentamiento invertido para evaluar la trabajabilidad.

3. Se llenan los moldes de los paneles utilizando una sola capa y se consolida el hormigón mediante vibración externa hasta nivelar aproximadamente con la parte superior del molde. Cada muestra se enrasó perpendicular al elevador de tensión tres veces.

Figura 3.49

Molde lleno y superficie del hormigón enrasada



Fuente: Elaboración propia

4. Tras el enrasado, se procede a pasar con planta (llana) un número predeterminado de veces sobre la superficie. Si la pérdida de humedad se determina desde el panel, se retira cualquier residuo de hormigón del exterior del molde.

Figura 3.50

Enrasado de la superficie del hormigón con llana metálica



Fuente: Elaboración propia

5. Se colocan un panel de mezcla reforzada con fibra y un panel de control en la cámara ambiental, aguas abajo del ventilador.

Figura 3.51

Paneles de hormigón en la cámara ambientada



Fuente: Elaboración propia

6. Se encienden el ventilador y el calentador, previamente ajustados para lograr las condiciones medioambientales que garanticen la evaporación necesaria. La evaluación de fisuras comienza a partir de este momento.
7. Al inicio de la prueba y cada 30 minutos, se registran la temperatura del aire, la humedad relativa y la velocidad del flujo de aire en una ubicación a 100 ± 5 mm por encima de la superficie de cada panel.
8. Durante la prueba, la temperatura debe mantenerse en 36 ± 3 °C, la humedad relativa en $30 \pm 10\%$, y la velocidad del viento debe ser suficiente para mantener una tasa mínima de evaporación de $1 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$. En la mayoría de los casos, una velocidad de 4,7 m/s es suficiente, aunque puede requerirse mayor velocidad para algunos paneles de control. La temperatura se mide con precisión de 0,5 °C, la humedad relativa con $\pm 10\%$ y la velocidad del aire con $\pm 0,1$ m/s.

Figura 3.52

Monitoreo de las condiciones ambientales del panel de ensayo según ASTM C1579, usando higrómetro y anemómetro



Fuente: Elaboración propia

9. La tasa de evaporación se determina mediante el pesaje de las fuentes de monitoreo al inicio de la prueba y cada 30 minutos. Se registra la pérdida de masa al ± 5 g y se calcula la tasa dividiendo la pérdida de masa por la superficie de agua y el intervalo de tiempo entre pesajes. La prueba no es válida si la tasa media de evaporación es menor a $1,0 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$.

Figura 3.53

Paneles de hormigón con las fuentes de monitoreo



Fuente: Elaboración propia

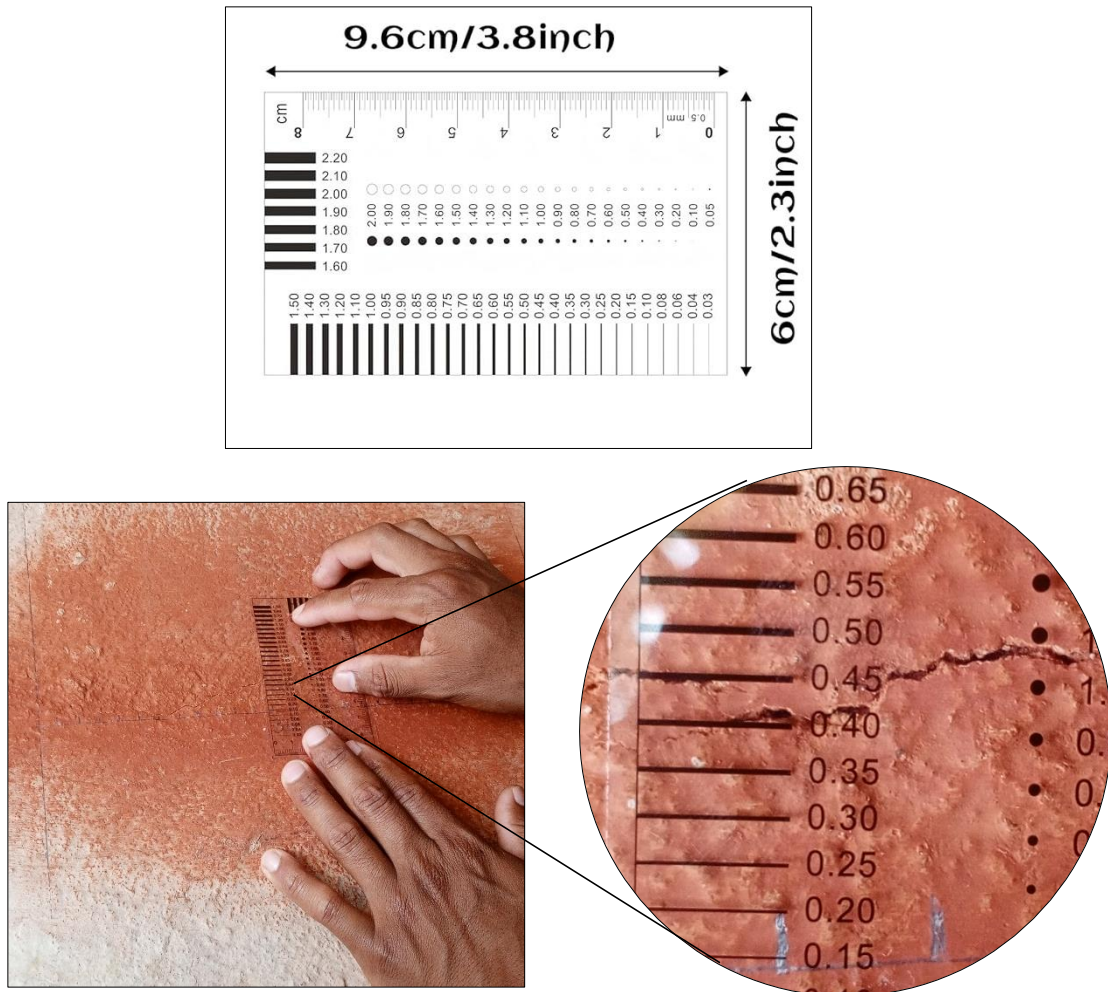
10. La unidad de prueba se compone de al menos dos paneles de control y al menos dos paneles de hormigón reforzado con fibras, con las mismas proporciones de mezcla. Cada grupo de dos paneles de control se prueba para determinar la reducción de fisuras por retracción plástica del hormigón reforzado.

3.12.4 Cuantificación de Fisuras

- La fisuración se cuantifica midiendo el ancho de las fisuras en la superficie de los paneles 24 ± 2 horas después del mezclado inicial.
- Para evitar efectos de los bordes del panel, no se deben medir fisuras dentro de los 25 mm desde los límites del panel.
- Para medir el ancho de fisura se utilizó un fisurómetro manual de precisión, realizando las lecturas inmediatamente después del ensayo. También se tomó en cuenta el uso de galgas metálicas, que tienen una precisión cercana a 0.05 mm, pero finalmente no se emplearon porque al introducirlas en la fisura pueden desprender o desgastar el material de los bordes. Esto va a alterar la abertura real y provocar errores en la medición, por lo que se decidió no utilizarlas para mantener la confiabilidad de los resultados.

Figura 3.54

Manera de cuantificar las fisuras



Fuente: Elaboración propia

- Se midió el ancho de cada fisura a intervalos regulares a lo largo de la trayectoria de la fisura sobre el elevador de tensión. Todos los valores se registraron para calcular el ancho medio de fisura.
- Finalmente, se calcula la relación de reducción de fisuras (CRR) utilizando la expresión correspondiente.

$$CRR = \left[1 - \frac{\text{Ancho promedio de fisura de la mezcla de hormigón reforzado con fibras}}{\text{Ancho promedio de fisura de la mezcla de hormigón de control}} \right] \times 100\%$$

3.13 Resultados del Ensayo de Índice de fisuración por Retracción Plástica ASTM C1579

En las tablas y figuras que se presentan a continuación, se muestran los resultados obtenidos de los paneles de hormigón elaborados sin microfibras de vidrio AR, Esta comparación permite analizar el efecto de las microfibras sobre la reducción de fisuración por retracción plástica en el hormigón. Ver Anexo VI

Tabla 3.48

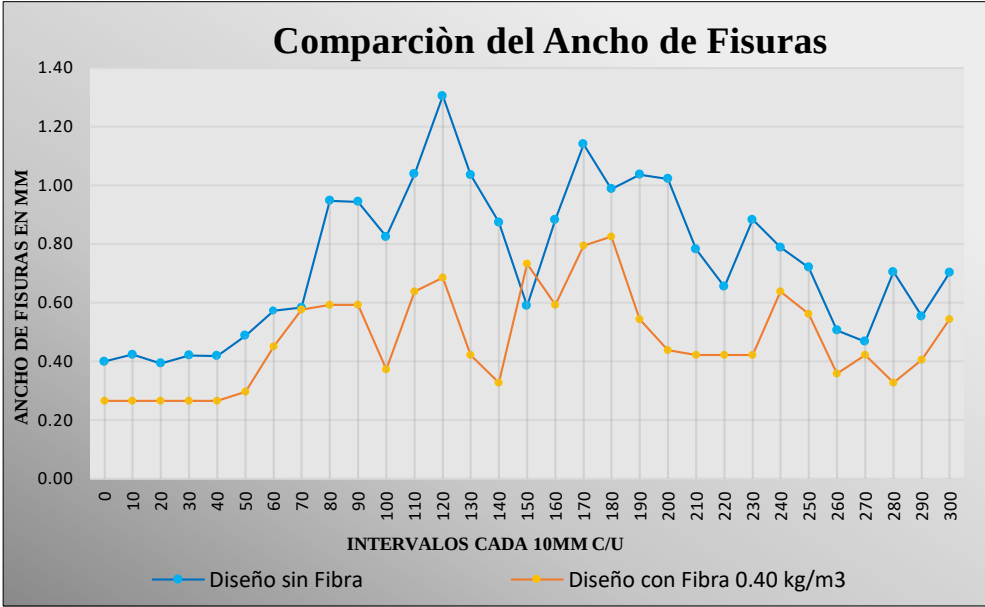
Resultados obtenidos en los ensayos de retracción plástica ASTM C1579 0.00 vs 0.40 - Tolomosa

Identificació n	fibra (kg/m ³)	Numero de paneles	Primera fisura	Ancho promedio de fisura (mm)	Desv. Est. del Ancho Promedio de Fisura (mm)	CRR %
Fibra de Vidrio (AR)	0.00	2	01:20:30	0.74	0.28	0.00
	0.40	2	01:42:00	0.47	0.19	36.23

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.55

Variación del ancho de fisura por intervalos de 10 mm en paneles con y sin fibra de vidrio AR.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.49

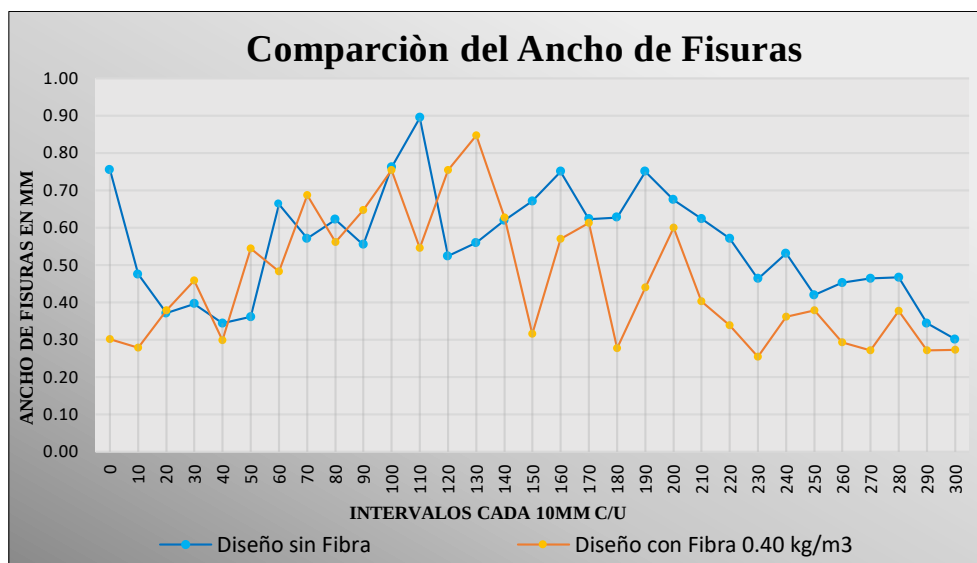
Resultados obtenidos en los ensayos de retracción plástica ASTM C1579 0.00 vs 0.40 - San Blas

Identificación	fibra (kg/m ³)	Numero de paneles	Primera fisura	Ancho promedio de fisura (mm)	Desv. Est. del Ancho Promedio de Fisura (mm)	CRR %
Fibra de Vidrio (AR)	0.00	2	01:23:30	0.56	0.16	0.00
	0.40	2	01:39:30	0.46	0.21	17.44

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.56

Variación del ancho de fisura por intervalos de 10 mm en paneles con y sin fibra de vidrio AR.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.50

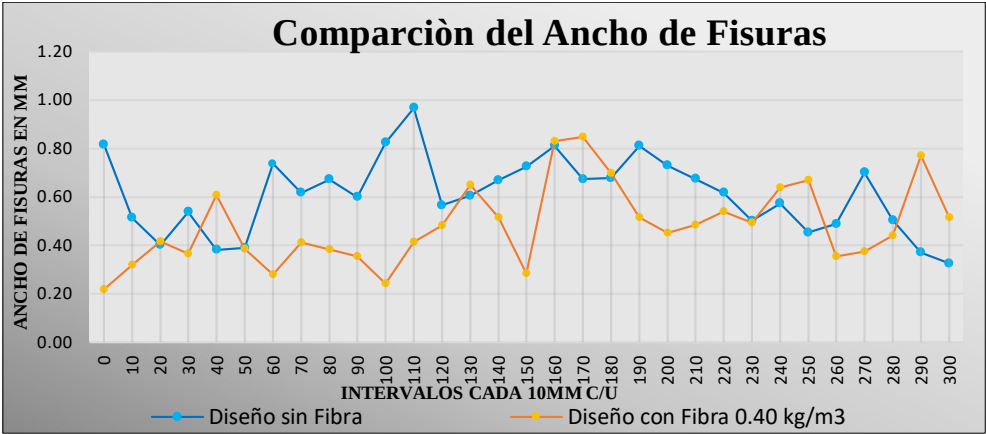
Resultados obtenidos en los ensayos de retracción plástica ASTM C1579 0.00 vs 0.40 - La Chozza

Identificación	fibra (kg/m ³)	Numero de paneles	Primera fisura	Ancho promedio de fisura (mm)	Desv. Est. del Ancho Promedio de Fisura (mm)	CRR %
Fibra de Vidrio (AR)	0.00	2	01:32:00	0.61	0.17	0.00
	0.40	2	01:39:30	0.48	0.22	20.99

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.57

Variación del ancho de fisura por intervalos de 10 mm en paneles con y sin fibra de vidrio AR



Fuente: Elaboración propia

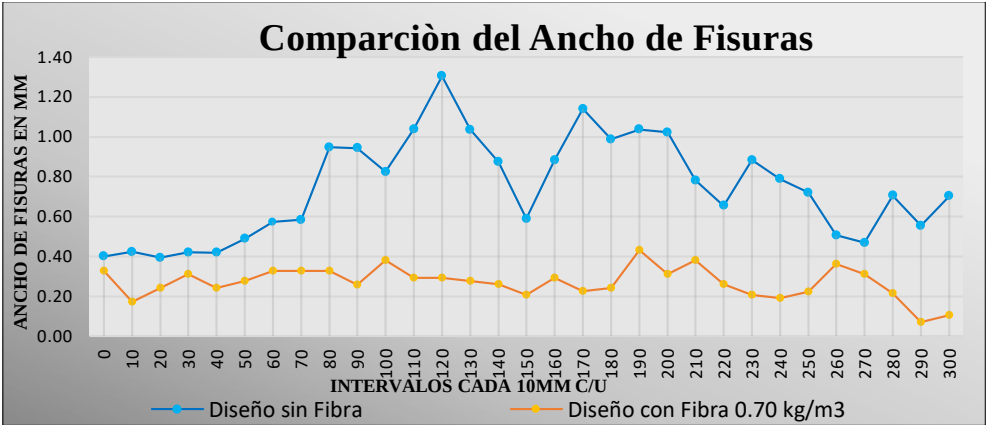
Tabla 3.51

Resultados obtenidos en los ensayos de retracción plástica ASTM C1579 0.00 vs 0.70 - Tolomosa

Identificación	fibra (kg/m ³)	Numero de paneles	Primera fisura	Ancho promedio de fisura (mm)	Desv. Est. del Ancho Promedio de Fisura (mm)	CRR %
Fibra de Vidrio (AR)	0.00	2	01:20:30	0.74	0.28	0.00
	0.70	2	01:58:30	0.27	0.11	63.84

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.58 Variación del ancho de fisura por intervalos de 10 mm en paneles con y sin fibra de vidrio AR



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.52

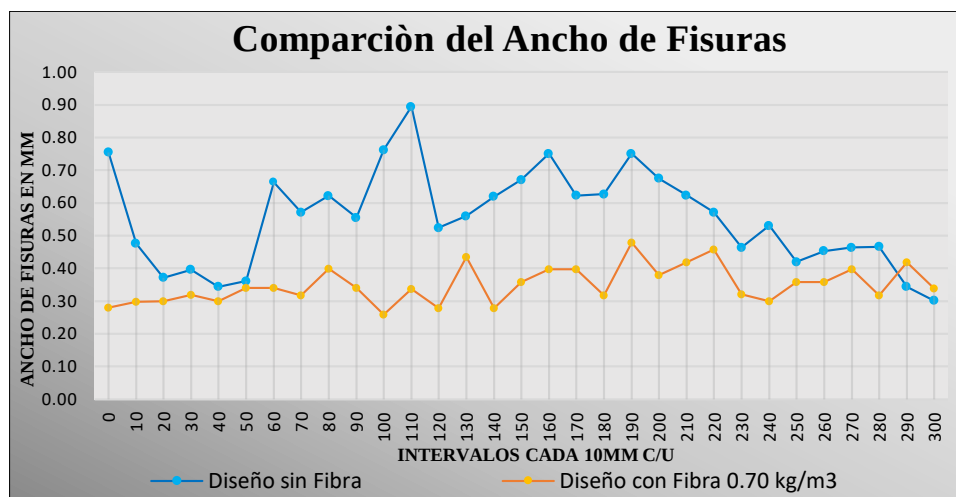
Resultados obtenidos en los ensayos de retracción plástica ASTM C1579 0.00 vs 0.70 - San Blas

Identificación	fibra (kg/m ³)	Numero de paneles	Primera fisura	Ancho promedio de fisura (mm)	Desv. Est. del Ancho Promedio de Fisura (mm)	CRR %
Fibra de Vidrio (AR)	0.00	2	01:21:00	0.56	0.16	0.00
	0.70	2	01:53:00	0.35	0.08	37.04

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.59

Variación del ancho de fisura por intervalos de 10 mm en paneles con y sin fibra de vidrio AR.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.53

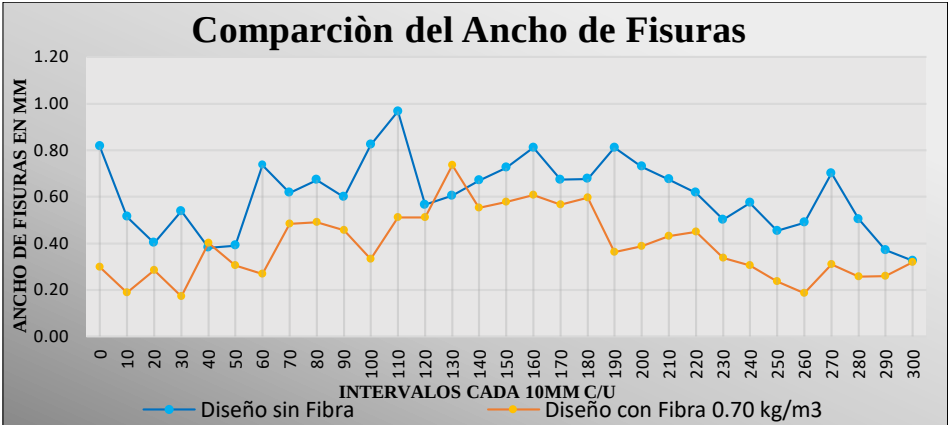
Resultados obtenidos en los ensayos de retracción plástica ASTM C1579 0.00 vs 0.70 - La Choza

Identificación	fibra (kg/m ³)	Numero de paneles	Primera fisura	Ancho promedio de fisura (mm)	Desv. Est. del Ancho Promedio de Fisura (mm)	CRR %
Fibra de Vidrio (AR)	0.00	2	01:32:30	0.61	0.17	0.00
	0.70	2	02:04:30	0.39	0.18	35.70

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.60

Variación del ancho de fisura por intervalos de 10 mm en paneles con y sin fibra de vidrio AR



Fuente: Elaboración propia

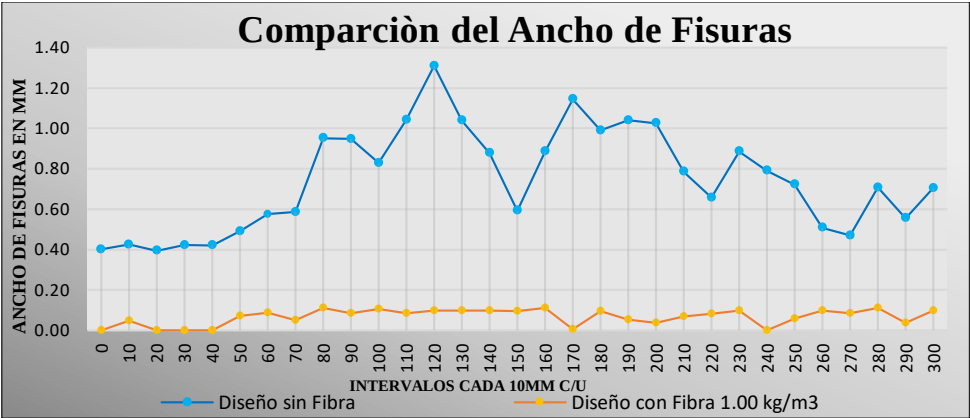
Tabla 3.54

Resultados obtenidos en los ensayos de retracción plástica ASTM C1579 0.00 vs 1.00 - Tolomosa

Identificación	fibra (kg/m³)	Numero de paneles	Primera fisura	Ancho promedio de fisura (mm)	Desv. Est. del Ancho Promedio de Fisura (mm)	CRR %
Fibra de Vidrio (AR)	0.00	2	01:31:30	0.75	0.28	0.00
	1.00	2	02:25:30	0.07	0.05	91.11

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.61 Variación del ancho de fisura por intervalos de 10 mm en paneles con y sin fibra de vidrio AR



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.55

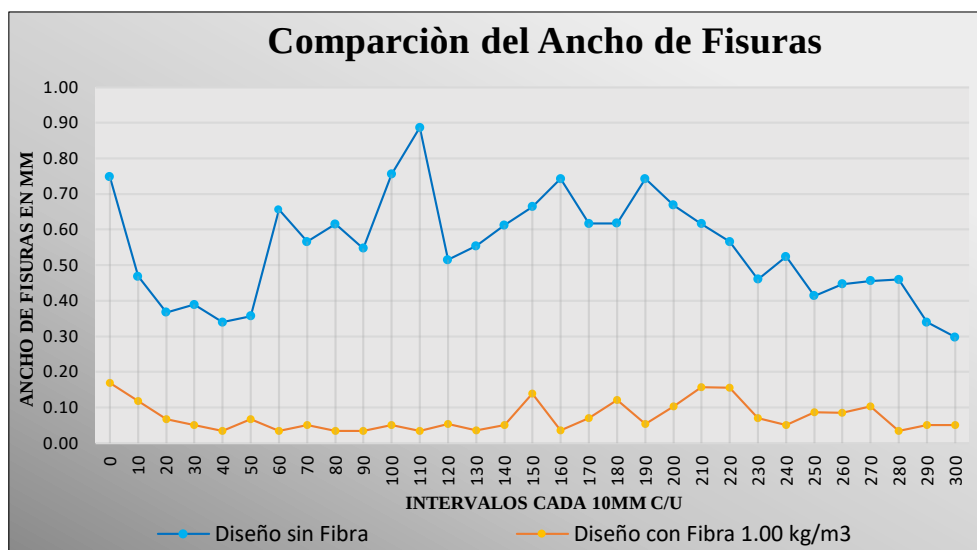
Resultados obtenidos en los ensayos de retracción plástica ASTM C1579 0.00 vs 1.00 - San Blas

Identificación	fibra (kg/m ³)	Numero de paneles	Primera fisura	Ancho promedio de fisura (mm)	Desv. Est. del Ancho Promedio de Fisura (mm)	CRR %
Fibra de Vidrio (AR)	0.00	2	01:44:00	0.55	0.16	0.00
	1.00	2	02:48:00	0.07	0.07	86.76

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.62

Variación del ancho de fisura por intervalos de 10 mm en paneles con y sin fibra de vidrio AR



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.56

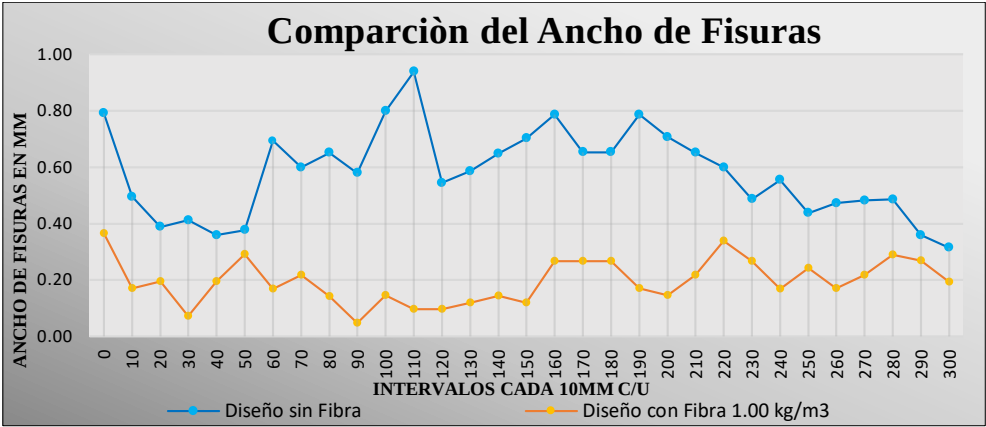
Resultados obtenidos en los ensayos de retracción plástica ASTM C1579 0.00 vs 1.00 - La Chozza

Identificación	fibra (kg/m ³)	Numero de paneles	Primera fisura	Ancho promedio de fisura (mm)	Desv. Est. del Ancho Promedio de Fisura (mm)	CRR %
Fibra de Vidrio (AR)	0.00	2	01:28:00	0.58	0.17	0.00
	1.00	2	02:39:30	0.20	0.11	66.20

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.63

Variación del ancho de fisura por intervalos de 10 mm en paneles con y sin fibra de vidrio AR



Fuente: Elaboración propia

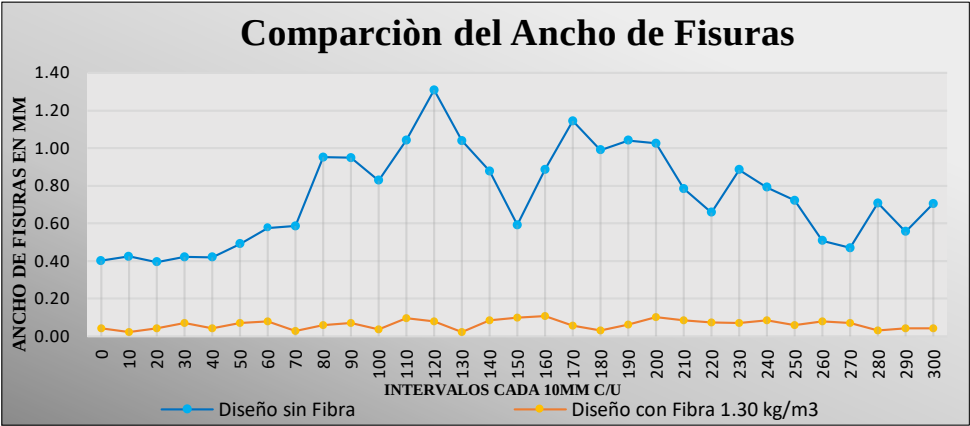
Tabla 3.57

Resultados obtenidos en los ensayos de retracción plástica ASTM C1579 0.00 vs 1.30 - Tolomosa

Identificación	fibra (kg/m ³)	Numero de paneles	Primera fisura	Ancho promedio de fisura (mm)	Desv. Est. del Ancho Promedio de Fisura (mm)	CRR %
Fibra de Vidrio (AR)	0.00	2	01:31:30	0.75	0.28	0.00
	1.30	2	02:40:30	0.06	0.04	91.67

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.64 Variación del ancho de fisura por intervalos de 10 mm en paneles con y sin fibra de vidrio AR



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.58

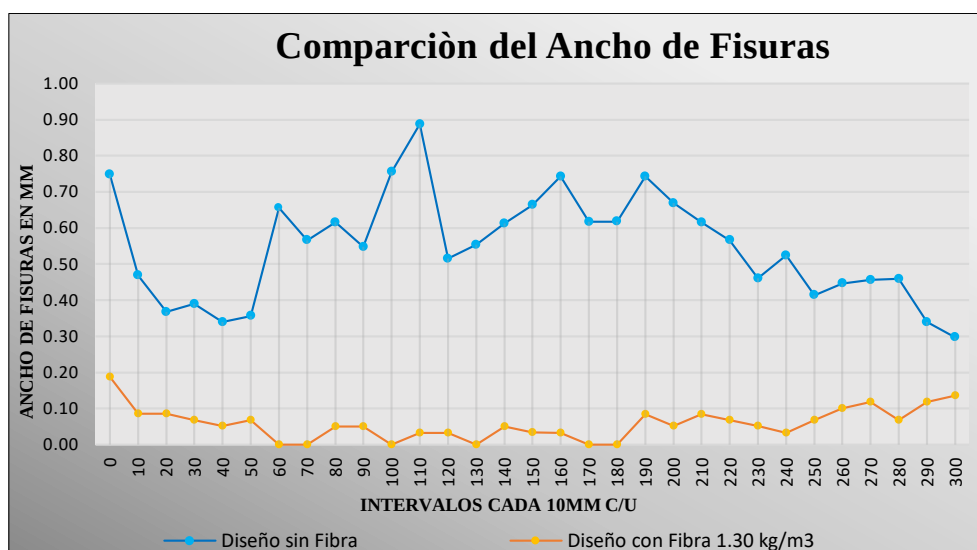
Resultados obtenidos en los ensayos de retracción plástica ASTM C1579 0.00 vs 1.30 - San Blas

Identificación	fibra (kg/m ³)	Numero de paneles	Primera fisura	Ancho promedio de fisura (mm)	Desv. Est. del Ancho Promedio de Fisura (mm)	CRR %
Fibra de Vidrio (AR)	0.00	2	01:44:00	0.55	0.16	0.00
	1.30	2	02:57:00	0.06	0.05	89.35

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.65

Variación del ancho de fisura por intervalos de 10 mm en paneles con y sin fibra de vidrio AR



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.59

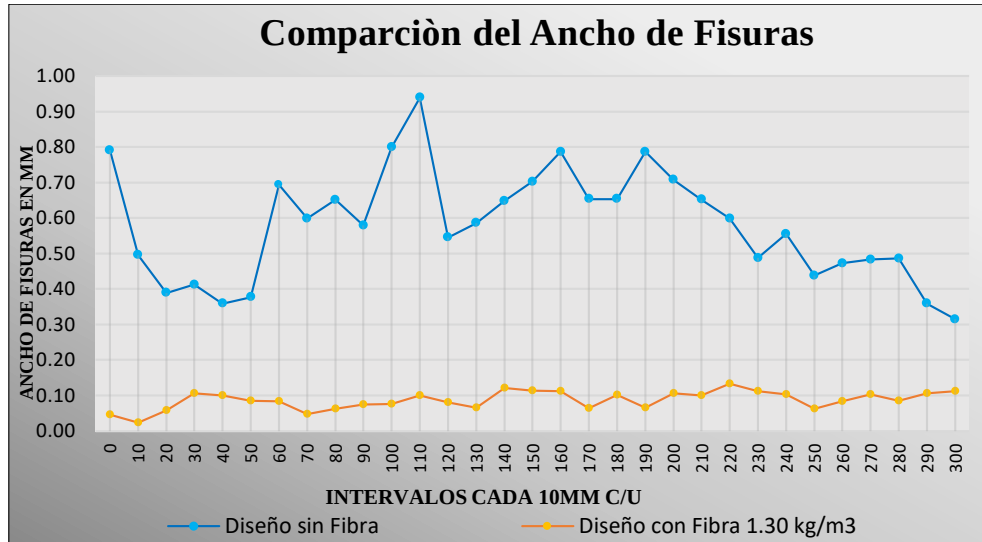
Resultados obtenidos en los ensayos de retracción plástica ASTM C1579 0.00 vs 1.30 - La Chozza

Identificación	fibra (kg/m ³)	Numero de paneles	Primera fisura	Ancho promedio de fisura (mm)	Desv. Est. del Ancho Promedio de Fisura (mm)	CRR %
Fibra de Vidrio (AR)	0.00	2	01:28:00	0.58	0.17	0.00
	1.30	2	03:12:30	0.09	0.04	85.05

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.66

Variación del ancho de fisura por intervalos de 10 mm en paneles con y sin fibra de vidrio AR



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.60

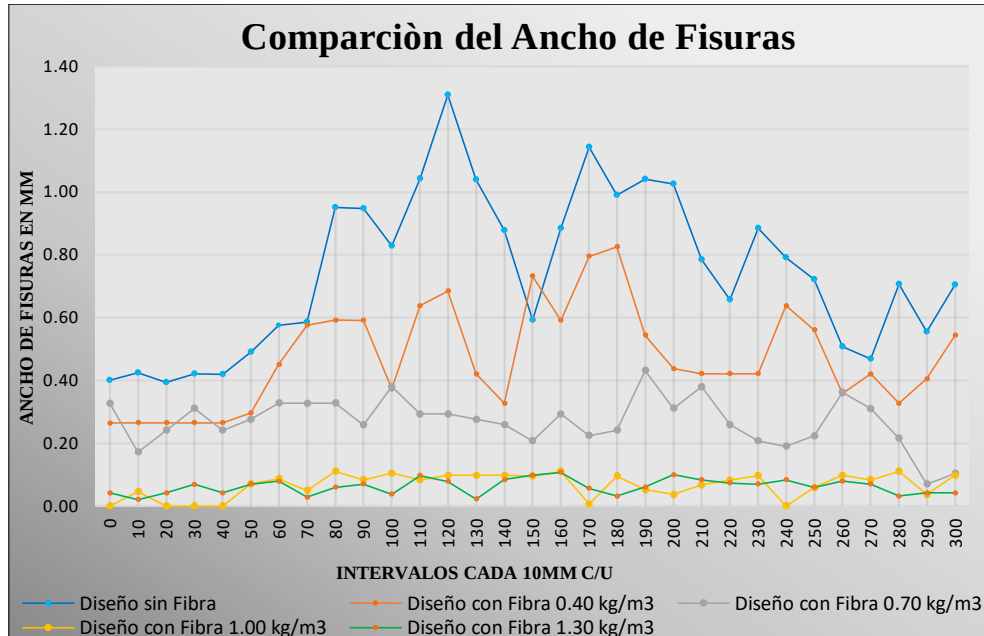
*Resultados obtenidos en los ensayos de retracción plástica ASTM C1579
"0.00 vs 0.40 vs 0.70 vs 1.00 vs 1.30" - Tolomosa*

Identificación	Fibra (kg/m ³)	Numero de paneles	Primera fisura	Ancho promedio de fisura (mm)	Desv. Est. del Ancho Promedio de Fisura (mm)	CRR %
Fibra de Vidrio (AR)	0.00	2	01:20:30	0.74	0.28	0.00
	0.40	2	01:42:00	0.47	0.19	36.23
Fibra de Vidrio (AR)	0.00	2	01:20:30	0.74	0.28	0.00
	0.70	2	01:58:30	0.27	0.11	63.84
Fibra de Vidrio (AR)	0.00	2	01:31:30	0.75	0.28	0.00
	1.00	2	02:25:30	0.07	0.05	91.11
Fibra de Vidrio (AR)	0.00	2	01:31:30	0.75	0.28	0.00
	1.30	2	02:40:30	0.06	0.04	91.67

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.67

Variación del ancho de fisura por intervalos de 10 mm en paneles con y sin fibra de vidrio AR



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.61

Resultados obtenidos en los ensayos de retracción plástica ASTM C1579

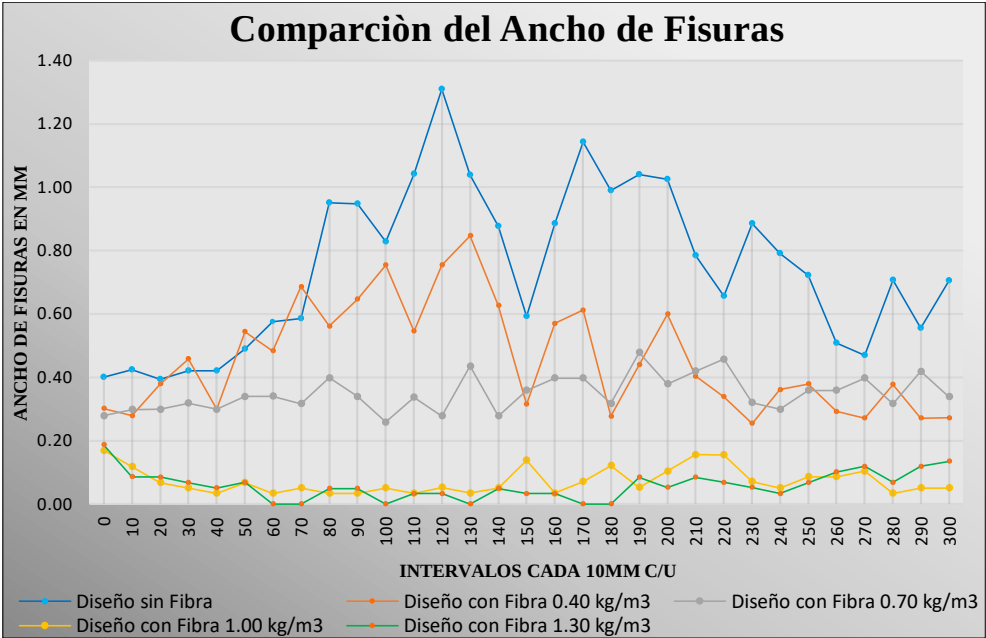
“0.00 vs 0.40 vs 0.70 vs 1.00 vs 1.30” vs 1.30 - San Blas

Identificación	Fibra (kg/m ³)	Numero de paneles	Primera fisura	Ancho promedio de fisura (mm)	Desv. Est. del Ancho Promedio de Fisura (mm)	CRR %
Fibra de Vidrio (AR)	0.00	2	01:23:30	0.56	0.16	0.00
	0.40	2	01:39:30	0.46	0.21	17.44
Fibra de Vidrio (AR)	0.00	2	01:21:00	0.56	0.16	0.00
	0.70	2	01:53:00	0.35	0.08	37.04
Fibra de Vidrio (AR)	0.00	2	01:44:00	0.55	0.16	0.00
	1.00	2	02:48:00	0.07	0.07	86.76
Fibra de Vidrio (AR)	0.00	2	01:44:00	0.55	0.16	0.00
	1.30	2	02:57:00	0.06	0.05	89.35

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.68

Variación del ancho de fisura por intervalos de 10 mm en paneles con y sin fibra de vidrio AR



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.62

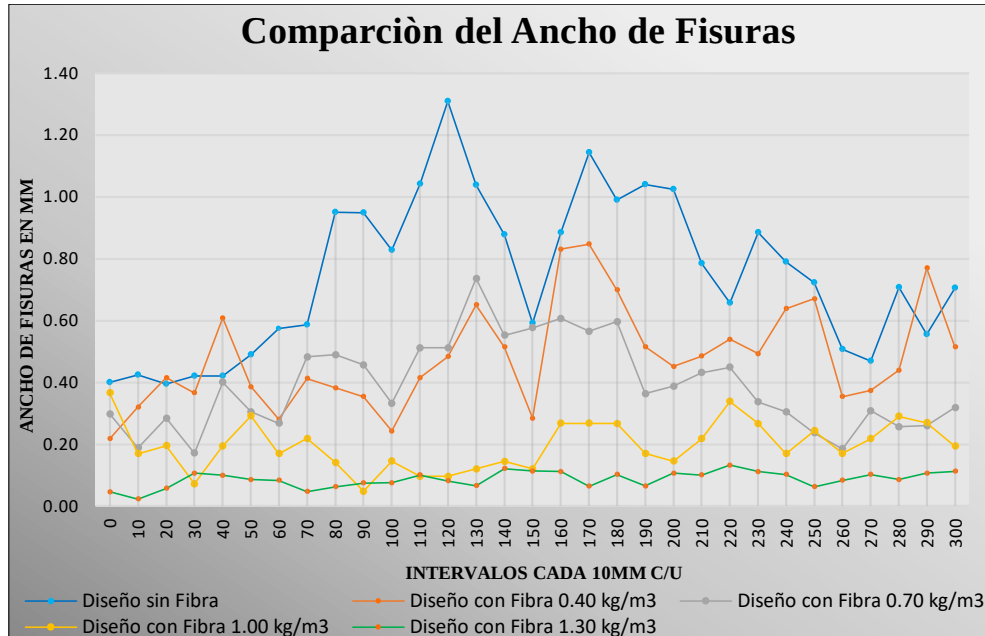
Resultados obtenidos en los ensayos de retracción plástica ASTM C1579
“0.00 vs 0.40 vs 0.70 vs 1.00 vs 1.30” - La Chozá

Identificación	Fibra (kg/m³)	Numero de paneles	Primera fisura	Ancho promedio de fisura (mm)	Desv. Est. del Ancho Promedio de Fisura (mm)	CRR %
Fibra de Vidrio (AR)	0.00	2	01:32:00	0.61	0.17	0.00
	0.40	2	01:39:30	0.48	0.22	20.99
Fibra de Vidrio (AR)	0.00	2	01:32:30	0.61	0.17	0.00
	0.70	2	02:04:30	0.39	0.18	35.70
Fibra de Vidrio (AR)	0.00	2	01:28:00	0.58	0.17	0.00
	1.00	2	02:39:30	0.20	0.11	66.20
Fibra de Vidrio (AR)	0.00	2	01:28:00	0.58	0.17	0.00
	1.30	2	03:12:30	0.09	0.04	85.05

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.69

Variación del ancho de fisura por intervalos de 10 mm en paneles con y sin fibra de vidrio AR



Fuente: Elaboración propia

3.14 Análisis Estadístico

Después de obtener los resultados de los ensayos de tracción de las muestras de hormigón, se procedió a realizar un análisis estadístico con el objetivo de evaluar la variabilidad y calidad del material. Para ello, se aplicaron los parámetros de control estadístico recomendados por el American Concrete Institute (ACI 214R-11, 2011), con el fin de utilizar indicadores que permitan valorar la uniformidad y el nivel de confianza de los resultados obtenidos.

El procedimiento se desarrolló siguiendo las recomendaciones establecidas en la norma ACI 214R-11 la cual proporciona métodos estadísticos para el aseguramiento de la calidad del hormigón y para la clasificación del grado de control en función de la desviación estándar.

De acuerdo con esta norma, el grado de control del hormigón se determina mediante la comparación de la desviación estándar experimental con los valores de referencia establecidos por el ACI, según se muestra en la Tabla, que presenta los

rangos aceptables de desviación estándar para distintos niveles de calidad del control de producción.

Tabla 3.63

Estándares de control del hormigón para $f'c \leq (350 \text{ kg/cm}^2)$

Clase de operación	Excelente	Muy buena	Buena	Regular	Mala
Construcción general / Pruebas en obra	< 28.6 kg/cm ²	28.6 – 34.7 kg/cm ²	34.7 – 41.8 kg/cm ²	41.8 – 49.0 kg/cm ²	> 49.0 kg/cm ²

Fuente: ACI 214R-11

Una vez ensayadas las probetas de hormigón, se determinó la resistencia característica correspondiente al valor que garantiza un grado de confianza del 90 %, lo cual implica que únicamente el 10 % de los resultados puede situarse por debajo del valor establecido como resistencia característica o de diseño.

En otras palabras, existe una probabilidad del 90 % de que los resultados individuales de resistencia de las probetas sean mayores o iguales que f_{ck}

Para la determinación de este valor se empleó la estadística básica del método de Student (distribución t de Student), considerando el tamaño de muestra limitado y la dispersión de los resultados experimentales.

La resistencia característica se obtiene aplicando la siguiente expresión:

$$f_{ck} = f_m - t \times S$$

Donde:

f_{ck} = Resistencia característica (obtenida a partir de los resultados obtenidos en los ensayos de las muestras) kg/cm²

f_m = Resistencia media de los ensayos kg/cm²

t = Coeficiente de la distribución t de Student, según el nivel de confianza y los grados de libertad (gl = N – 1)

S = Desviación estándar muestral kg/cm²

Para implementar el plan de aceptación, se utilizó como parámetro de control la sección ACI 325.9R-8 y sus versiones posteriores. Según este estándar, el hormigón se considera satisfactorio si cumple con los siguientes criterios:

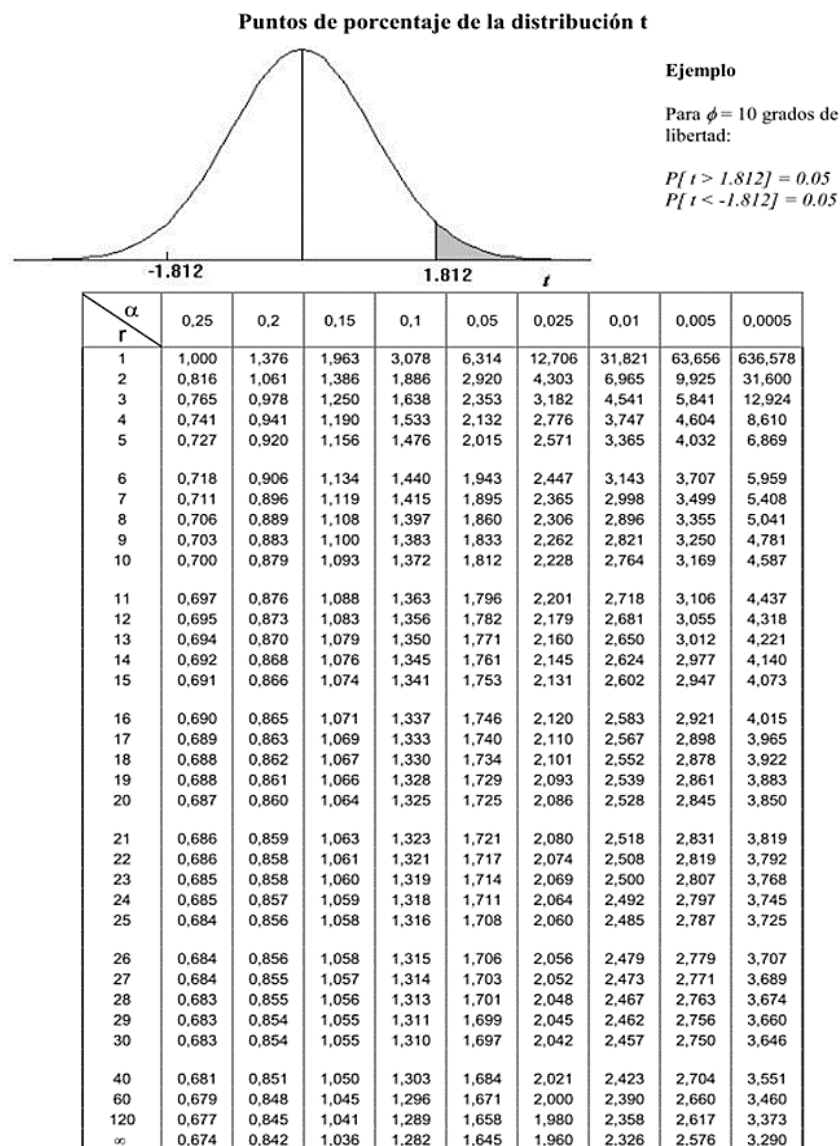
Criterio 1: Según el numeral 3.5, cada promedio aritmético de tres ensayos consecutivos (media móvil) debe ser igual o superior a la resistencia de diseño f_{ck}

Criterio 2: En el caso de resistencia a la tracción, ningún valor individual debe ser menor en (5 kg/cm²) respecto a la resistencia de diseño.

Para la resistencia a la compresión, ningún valor puede ser inferior en (35 kg/cm²) respecto a la resistencia de diseño.

Figura 3.70

Distribución t de Student



Fuente: William Sealy Gosset

Tabla 3.64

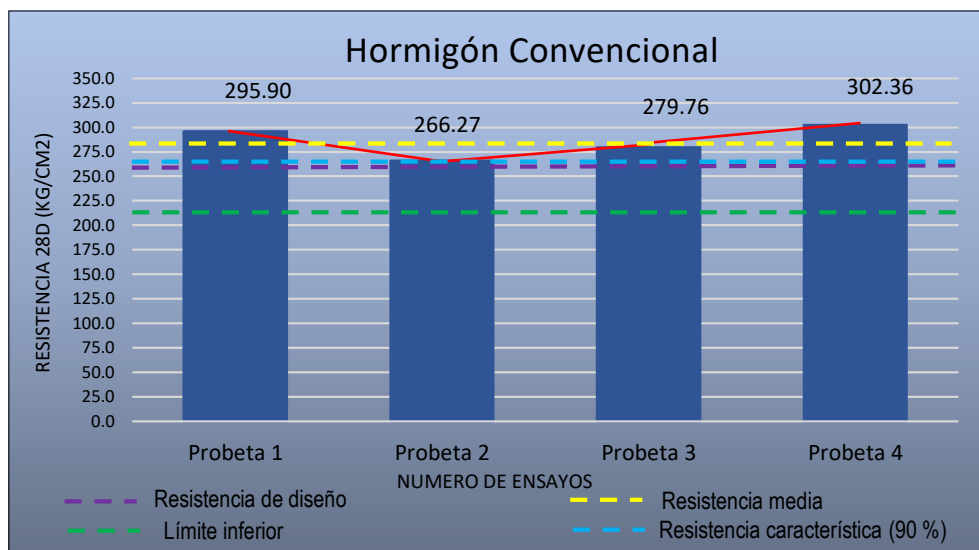
Resistencia a Compresión a los 28 días H°-CV - Tolomosa

Identificación	Edad (días)	# de ensayos	Resistencia a (fct) (kg/cm²)	1 criterio (Media móvil $\geq f'_{ck}$)	2 criterio (Ensayo individual $\geq f'_{ck}-35$)
Probeta 1	28	1	295.90	CUMPLE	CUMPLE
Probeta 2	28	2	266.27		CUMPLE
Probeta 3	28	3	279.76	CUMPLE	CUMPLE
Probeta 4	28	4	302.36		CUMPLE
Resistencia media		f(kg/cm²)	286.07		
Cantidad de datos		Nº	4		
Varianza muestral		S²(kg/cm²)²	264.54		
Desviación estándar		S (kg/cm²)	16.26		
Coeficiente de variación		CV (%)	5.7		
Grado de control		Excelente			
Grados de libertad		gl	3		
Nivel de significancia		α	0.100		
Coeficiente t (Student)		t	1.64		
Resistencia característica (90		fck(kg/cm²)	259.43		
Resistencia de diseño (Proyecto)		fck(kg/cm²)	250.0		
Límite inferior – Compresión		fck -35(kg/cm²)	215.0		

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.71

Análisis estadístico resistencia a Compresión a los 28 días H°-CV - Tolomosa



Fuente: Elaboración propia

El hormigón ensayado a 28 días presenta una resistencia media de 286 kg/cm², con baja dispersión (CV 5.7%), cumpliendo todos los criterios de calidad. La resistencia característica (259 kg/cm²) supera la resistencia de diseño (250 kg/cm²), por lo que el material es seguro para su uso estructural.

Tabla 3.65

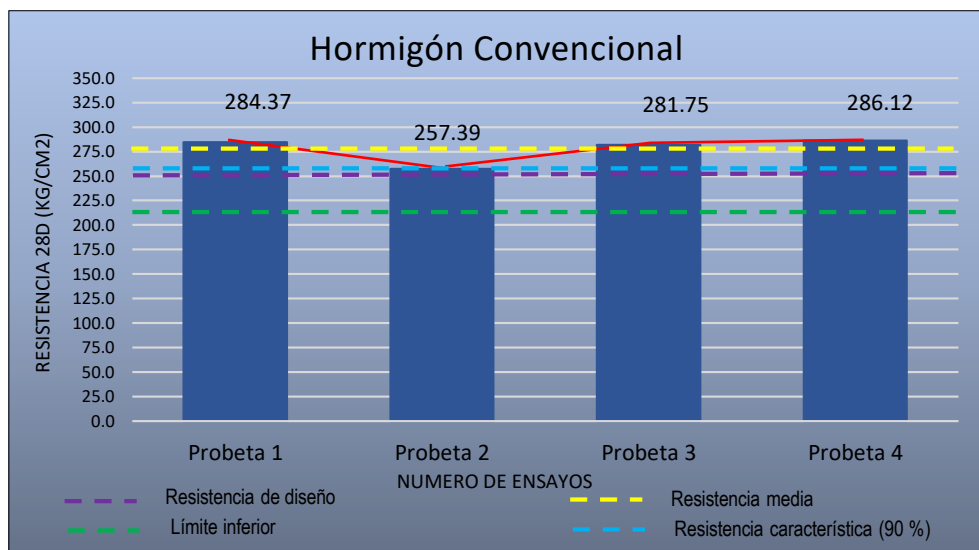
Resistencia a Compresión a los 28 días H°-CV – San Blas

Identificación	Edad (días)	# de ensayos	Resistencia a (fct) (kg/cm²)	1 criterio (Media móvil ≥ f'ck)	2 criterio (Ensayo individual ≥ f'ck-35)
Probeta 1	28	1	284.37	CUMPLE	CUMPLE
Probeta 2	28	2	257.39		CUMPLE
Probeta 3	28	3	281.75	CUMPLE	CUMPLE
Probeta 4	28	4	286.12		CUMPLE
Resistencia media		f(kg/cm²)	277.41		
Cantidad de datos		N°	4		
Varianza muestral		S²(kg/cm²)²	181.27		
Desviación estándar		S (kg/cm²)	13.46		
Coeficiente de variación		CV (%)	4.9		
Grado de control		Excelente			
Grados de libertad		gl	3		
Nivel de significancia		α	0.100		
Coeficiente t (Student)		t	1.64		
Resistencia característica (90 %)		fck(kg/cm²)	255.35		
Resistencia de diseño (Proyecto)		fck(kg/cm²)	250.0		
Límite inferior – Compresión		fck -35(kg/cm²)	215.0		

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.72

Análisis estadístico resistencia a Compresión a los 28 días H°-CV - San Blas



Fuente: Elaboración propia

El hormigón ensayado a 28 días presenta una resistencia media de 277 kg/cm², con baja dispersión (CV 4.9%), cumpliendo todos los criterios de calidad. La resistencia característica (255 kg/cm²) supera la resistencia de diseño (250 kg/cm²), por lo que el material es seguro para su uso estructural.

Tabla 3.66

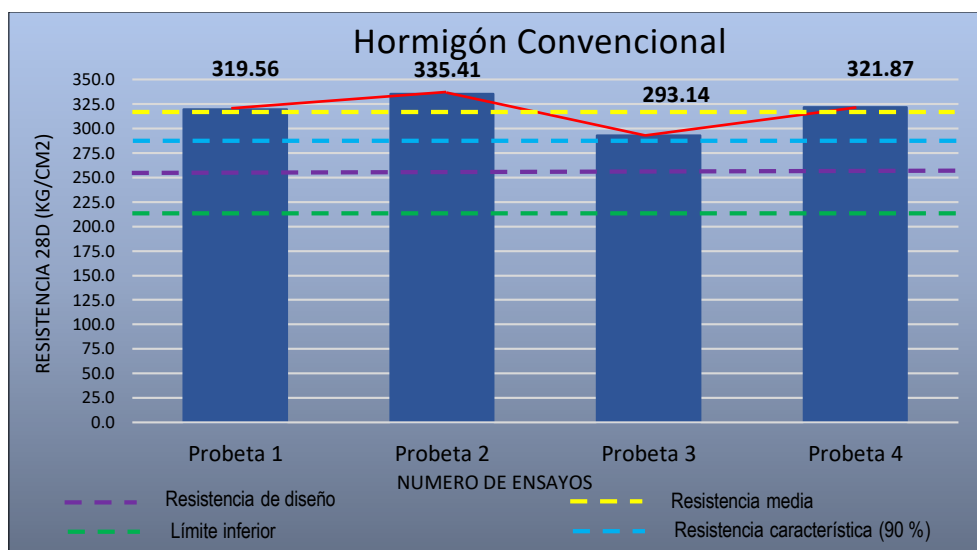
Resistencia a Compresión a los 28 días H°-CV – La Choz

Identificación	Edad (días)	# de ensayos	Resistencia a (fct) (kg/cm²)	1 criterio (Media móvil $\geq f'_{ck}$)	2 criterio (Ensayo individual $\geq f'_{ck}-3S$)
Probeta 1	28	1	319.56	CUMPLE	CUMPLE
Probeta 2	28	2	335.41		CUMPLE
Probeta 3	28	3	293.14	CUMPLE	CUMPLE
Probeta 4	28	4	321.87		CUMPLE
Resistencia media		f(kg/cm²)	317.49		
Cantidad de datos		N°	4		
Varianza muestral		S²(kg/cm²)²	312.49		
Desviación estándar		S (kg/cm²)	17.68		
Coefficiente de variación		CV (%)	5.6		
Grado de control		Excelente			
Grados de libertad		gl	3		
Nivel de significancia		α	0.100		
Coefficiente t (Student)		t	1.64		
Resistencia característica (90 %)		fck(kg/cm²)	288.54		
Resistencia de diseño (Proyecto)		fck(kg/cm²)	250.0		
Límite inferior – Compresión		fck -3S(kg/cm²)	215.0		

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.73

Análisis estadístico resistencia a Compresión a los 28 días H°-CV - La Choz



Fuente: Elaboración propia

El hormigón ensayado a 28 días presenta una resistencia media de 317 kg/cm², con baja dispersión (CV 5.6%), cumpliendo todos los criterios de calidad. La resistencia característica (288.5 kg/cm²) supera la resistencia de diseño (250 kg/cm²), por lo que el material es seguro para su uso estructural.

Tabla 3.67

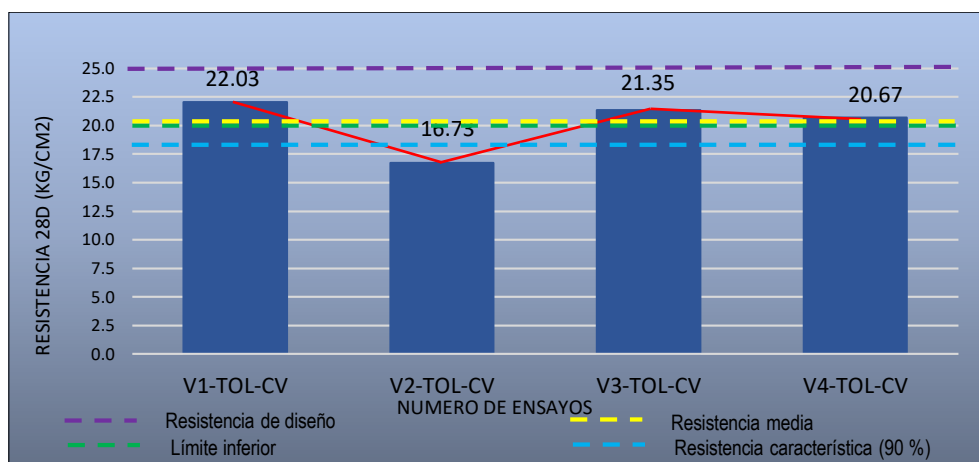
Resistencia a tracción a los 28 días con 0.00 de Fibra de Vidrio AR - Tolomosa

Dosificación de fibra (kg/m³)	Edad (días)	# de ensayos	Resistencia a (fct) (kg/cm²)	1 criterio (Media móvil ≥ f'ck)	2 criterio (Ensayo individual ≥ f'ck-5)
V1-TOL-CV	28	1	22.03	NO CUMPLE	CUMPLE
V2-TOL-CV	28	2	16.73		NO CUMPLE
V3-TOL-CV	28	3	21.35	NO CUMPLE	CUMPLE
V4-TOL-CV	28	4	20.67		CUMPLE
Resistencia media		f(kg/cm²)	20.20		
Cantidad de datos		Nº	4		
Varianza muestral		S²(kg/cm²)²	5.65		
Desviación estándar		S (kg/cm²)	2.38		
Coeficiente de variación		CV (%)	11.8		
Grado de control		Excelente			
Grados de libertad		gl	3		
Nivel de significancia		α	0.1		
Coeficiente t (Student)		t	1.64		
Resistencia característica (90 %)		fck(kg/cm²)	16.30		
Resistencia de diseño (Proyecto)		f'ck(kg/cm²)	25.0		
Límite inferior – Tracción		f'ck-5 (kg/cm²)	20.0		

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.74

Análisis estadístico resistencia a tracción a los 28 días con 0.00 de Fibra de Vidrio AR - Tolomosa



Fuente: Elaboración propia

Las vigas a 28 días presentan una resistencia media de 20.2 kg/cm² y resistencia característica de 16.30 kg/cm², ambas inferiores a la resistencia de diseño (25 kg/cm²). Aunque algunos ensayos individuales cumplen el límite mínimo, en general el material no alcanza la resistencia esperada frente a la tracción.

Tabla 3.68

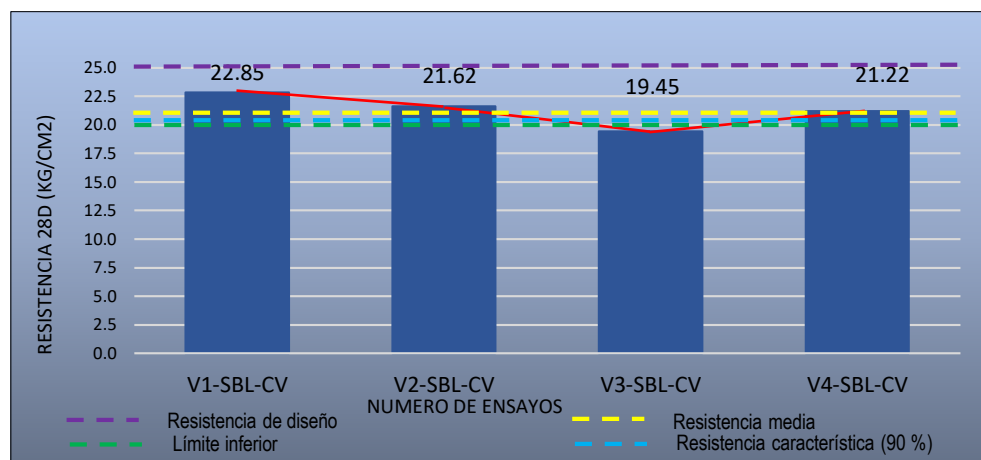
Resistencia a tracción a los 28 días con 0.00 de Fibra de Vidrio AR – San Blas

Dosificación de fibra (kg/m ³)	Edad (días)	# de ensayos	Resistencia a (fct) (kg/cm ²)	1 criterio (Media móvil $\geq f'_{ck}$)	2 criterio (Ensayo individual $\geq f'_{ck}-5$)
V1-SBL-CV	28	1	22.85	NO CUMPLE	CUMPLE
V2-SBL-CV	28	2	21.62		CUMPLE
V3-SBL-CV	28	3	19.45	NO CUMPLE	NO CUMPLE
V4-SBL-CV	28	4	21.22		CUMPLE
Resistencia media		f(kg/cm ²)	21.28		
Cantidad de datos		Nº	4		
Varianza muestral		S ² (kg/cm ²) ²	1.98		
Desviación estándar		S (kg/cm ²)	1.41		
Coeficiente de variación		CV (%)	6.6		
Grado de control		Excelente			
Grados de libertad		gl	3		
Nivel de significancia		α	0.1		
Coeficiente t (Student)		t	1.64		
Resistencia característica (90 %)		f _{ck} (kg/cm ²)	18.98		
Resistencia de diseño (Proyecto)		f' _{ck} (kg/cm ²)	25.0		
Límite inferior – Tracción		f _{ck} -5 (kg/cm ²)	20.0		

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.75

Análisis estadístico resistencia a tracción a los 28 días con 0.00 de Fibra de Vidrio AR - San Blas



Fuente: Elaboración propia

En las vigas del lote SBL-CV a 28 días, la resistencia promedio fue de 21.28 kg/cm², mostrando uniformidad entre los ensayos (CV 6.6%). Sin embargo, la resistencia característica de 20.13 kg/cm² queda por debajo del valor de diseño (25 kg/cm²). Esto indica que, aunque la mezcla es consistente, el material no alcanza la capacidad estructural requerida, y algunas vigas individuales incluso están en el límite inferior, lo que refleja una debilidad puntual en la tracción.

Tabla 3.69

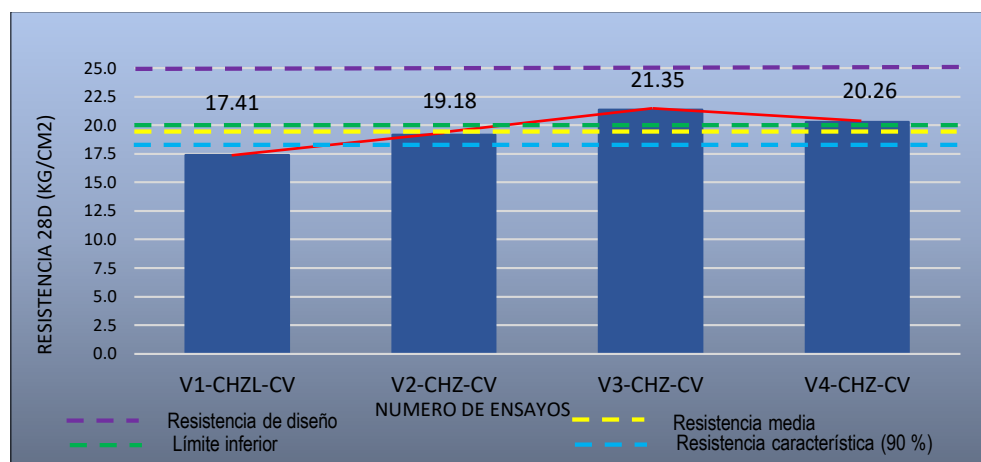
Resistencia a tracción a los 28 días con 0.00 de Fibra de Vidrio AR – La Chozá

Dosificación de fibra (kg/m³)	Edad (días)	# de ensayos	Resistencia a (fct) (kg/cm²)	1 criterio (Media móvil ≥ f'ck)	2 criterio (Ensayo individual ≥ f'ck-5)
V1-CHZL-CV	28	1	17.41	NO CUMPLE	NO CUMPLE
V2-CHZ-CV	28	2	19.18		NO CUMPLE
V3-CHZ-CV	28	3	21.35	NO CUMPLE	CUMPLE
V4-CHZ-CV	28	4	20.26		CUMPLE
Resistencia media		f(kg/cm²)	19.55		
Cantidad de datos		Nº	4		
Varianza muestral		S²(kg/cm²)²	2.83		
Desviación estándar		S (kg/cm²)	1.68		
Coeficiente de variación		CV (%)	8.6		
Grado de control		Excelente			
Grados de libertad		gl	3		
Nivel de significancia		α	0.1		
Coeficiente t (Student)		t	1.64		
Resistencia característica (90 %)		fck(kg/cm²)	16.80		
Resistencia de diseño (Proyecto)		f'ck(kg/cm²)	25.0		
Límite inferior – Tracción		f'ck-5 (kg/cm²)	20.0		

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.76

Análisis estadístico resistencia a tracción a los 28 días con 0.00 de Fibra de Vidrio AR - La Chozá



Fuente: Elaboración propia

En las vigas CHZL-CV a 28 días, la resistencia media fue de 19.55 kg/cm² con un coeficiente de variación del 8.6%, mostrando dispersión moderada entre los ensayos. La resistencia característica de 18.17 kg/cm² queda claramente por debajo del valor de diseño de 25 kg/cm², e incluso algunas vigas no cumplen el límite inferior de 20 kg/cm². Esto evidencia que el lote presenta deficiencias importantes en tracción, y su desempeño estructural no garantiza la seguridad requerida.

Tabla 3.70

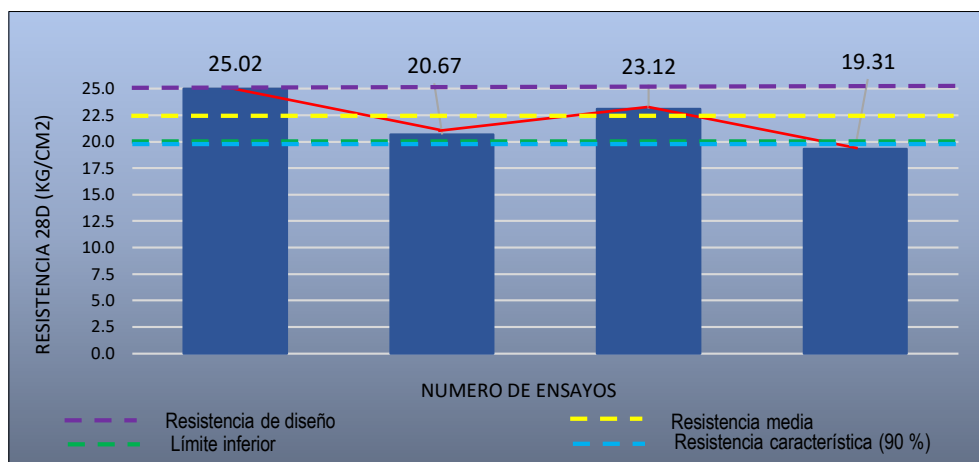
Resistencia a tracción a los 28 días con 0.40 de Fibra de Vidrio AR - Tolomosa

Dosificación de fibra (kg/m ³)	Edad (días)	# de ensayos	Resistencia a (fct) (kg/cm ²)	1 criterio (Media móvil $\geq f'_{ck}$)	2 criterio (Ensayo individual $\geq f'_{ck}-5$)
V1-TOL-0.40	28	1	25.02	NO CUMPLE	CUMPLE
V2-TOL-0.40	28	2	20.67		CUMPLE
V3-TOL-0.40	28	3	23.12	NO CUMPLE	CUMPLE
V4-TOL-0.40	28	4	19.31		NO CUMPLE
Resistencia media		f(kg/cm²)	22.03		
Cantidad de datos		N°	4		
Varianza muestral		S²(kg/cm²)²	6.46		
Desviación estándar		S (kg/cm²)	2.54		
Coefficiente de variación		CV (%)	11.5		
Grado de control		Excelente			
Grados de libertad		gl	3		
Nivel de significancia		α	0.1		
Coefficiente t (Student)		t	1.64		
Resistencia característica (90 %)		f_{ck}(kg/cm²)	17.87		
Resistencia de diseño (Proyecto)		f_{ck}(kg/cm²)	25.0		
Límite inferior – Tracción		f_{ck}-5 (kg/cm²)	20.0		

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.77

Análisis estadístico resistencia a tracción a los 28 días con 0.40 de Fibra de Vidrio AR - Tolomosa



Fuente: Elaboración propia

En las vigas con 0.40 % de fibra del lote TOL a 28 días, la resistencia media fue de 22.03 kg/cm², con moderada dispersión (CV 11.5%) entre los ensayos. La resistencia característica de 19.95 kg/cm² se encuentra ligeramente por debajo del valor de diseño (25 kg/cm²) y del límite inferior de 20 kg/cm², lo que indica que algunas vigas no alcanzan la resistencia mínima, evidenciando que el lote presenta un desempeño irregular frente a la tracción.

Tabla 3.71

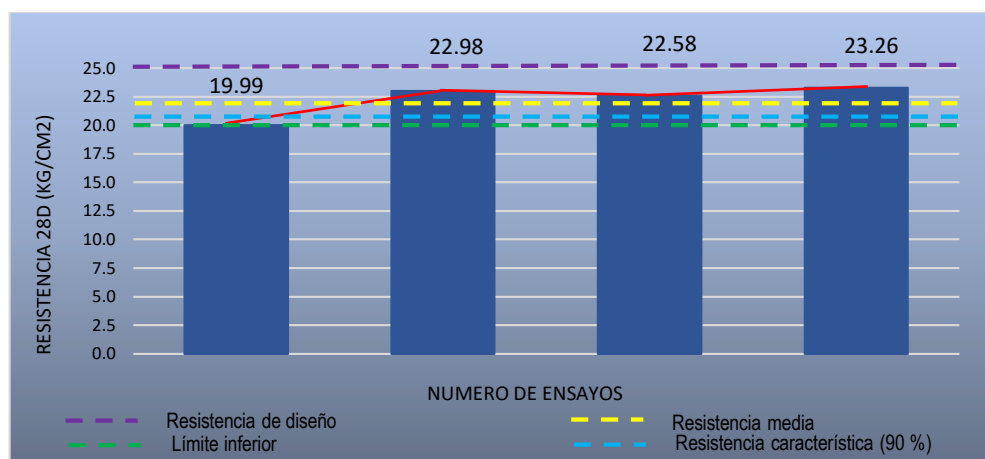
Resistencia a tracción a los 28 días con 0.40 de Fibra de Vidrio AR – San Blas

Dosificación de fibra (kg/m³)	Edad (días)	# de ensayos	Resistencia a (fct) (kg/cm²)	1 criterio (Media móvil ≥ f'ck)	2 criterio (Ensayo individual ≥ f'ck-5)
V1-SBL-0.40	28	1	19.99	NO CUMPLE	NO CUMPLE
V2-SBL-0.40	28	2	22.98		CUMPLE
V3-SBL-0.40	28	3	22.58	NO CUMPLE	CUMPLE
V4-SBL-0.40	28	4	23.26		CUMPLE
Resistencia media		f(kg/cm²)	22.20		
Cantidad de datos		N°	4		
Varianza muestral		S²(kg/cm²)²	2.25		
Desviación estándar		S (kg/cm²)	1.50		
Coeficiente de variación		CV (%)	6.8		
Grado de control		Excelente			
Grados de libertad		gl	3		
Nivel de significancia		α	0.1		
Coeficiente t (Student)		t	1.64		
Resistencia característica (90 %)		fck(kg/cm²)	19.75		
Resistencia de diseño (Proyecto)		f'ck(kg/cm²)	25.0		
Límite inferior – Tracción		f'ck-5 (kg/cm²)	20.0		

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.78

Análisis estadístico resistencia a tracción a los 28 días con 0.40 de Fibra de Vidrio AR - San Blas



Fuente: Elaboración propia

Las vigas con 0.40 % de fibra del lote SBL a 28 días, la resistencia media fue de 22.20 kg/cm², con baja dispersión entre ensayos (CV 6.8%). La resistencia característica de 20.97 kg/cm² queda por debajo del valor de diseño (25 kg/cm²) pero ligeramente por encima del límite mínimo de 20 kg/cm², indicando que, aunque el material tiene cierta consistencia, su desempeño frente a la tracción no alcanza completamente los requerimientos del proyecto.

Tabla 3.72

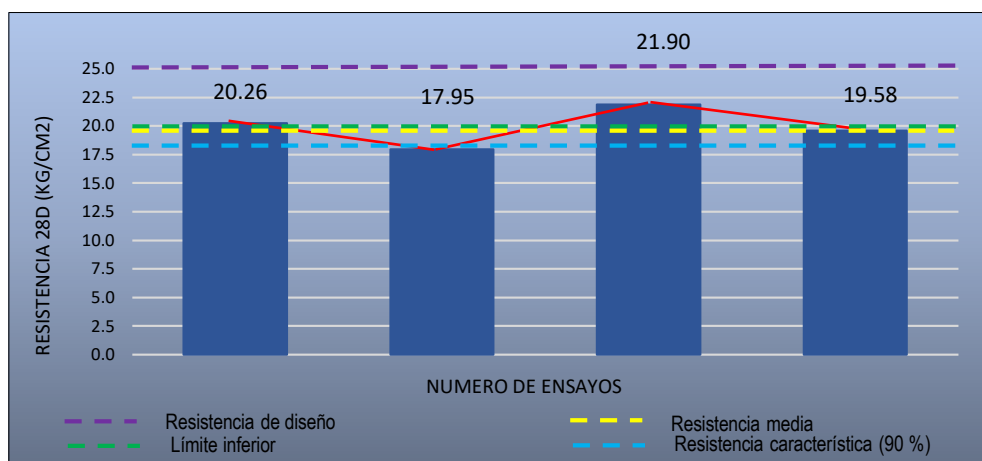
Resistencia a tracción a los 28 días con 0.40 de Fibra de Vidrio AR – La Choz

Dosificación de fibra (kg/m³)	Edad (días)	# de ensayos	Resistencia a (fct) (kg/cm²)	1 criterio (Media móvil ≥ f'ck)	2 criterio (Ensayo individual ≥ f'ck-5)
V1-CHZ-0.40	28	1	20.26	NO CUMPLE	CUMPLE
V2-CHZ-0.40	28	2	17.95		NO CUMPLE
V3-CHZ-0.40	28	3	21.90	NO CUMPLE	CUMPLE
V4-CHZ-0.40	28	4	19.58		NO CUMPLE
Resistencia media		f(kg/cm²)	19.92		
Cantidad de datos		N°	4		
Varianza muestral		S²(kg/cm²)²	2.67		
Desviación estándar		S (kg/cm²)	1.63		
Coeficiente de variación		CV (%)	8.2		
Grado de control		Excelente			
Grados de libertad		gl	3		
Nivel de significancia		α	0.10		
Coeficiente t (Student)		t	1.64		
Resistencia característica (90 %)		fck(kg/cm²)	17.25		
Resistencia de diseño (Proyecto)		f'ck(kg/cm²)	25.0		
Límite inferior – Tracción		f'ck-5 (kg/cm²)	20.0		

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.79

Análisis estadístico resistencia a tracción a los 28 días con 0.40 de Fibra de Vidrio AR - La Choz



Fuente: Elaboración propia

En las vigas con 0.40 % de fibra del lote CHZ a 28 días, la resistencia media fue de 19.92 kg/cm², con dispersión moderada (CV 8.2%) entre los ensayos. La resistencia característica de 18.59 kg/cm² queda por debajo del valor de diseño (25 kg/cm²) y también del límite inferior (20 kg/cm²), lo que indica que el material no alcanza la tracción requerida y presenta debilidad generalizada en este lote.

Tabla 3.73

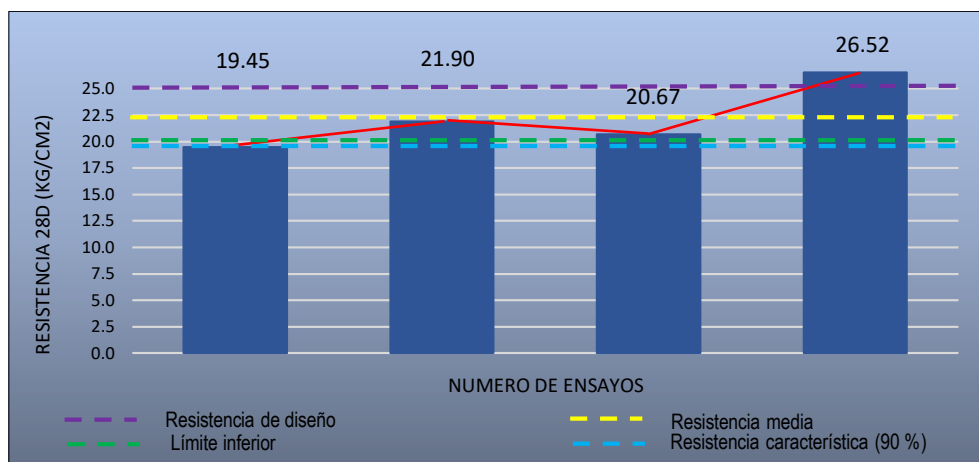
Resistencia a tracción a los 28 días con 0.70 de Fibra de Vidrio AR - Tolomosa

Dosificación de fibra (kg/m³)	Edad (días)	# de ensayos	Resistencia a (fct) (kg/cm²)	1 criterio (Media móvil ≥ f'ck)	2 criterio (Ensayo individual ≥ f'ck-5)
V1-TOL-0.70	28	1	19.45	NO CUMPLE	NO CUMPLE
V2-TOL-0.70	28	2	21.90		CUMPLE
V3-TOL-0.70	28	3	20.67	NO CUMPLE	CUMPLE
V4-TOL-0.70	28	4	26.52		CUMPLE
Resistencia media		f(kg/cm²)	22.13		
Cantidad de datos		N°	4		
Varianza muestral		S²(kg/cm²)²	9.55		
Desviación estándar		S (kg/cm²)	3.09		
Coeficiente de variación		CV (%)	14.0		
Grado de control		Muy bueno			
Grados de libertad		gl	3		
Nivel de significancia		α	0.10		
Coeficiente t (Student)		t	1.64		
Resistencia característica (90 %)		fck(kg/cm²)	17.07		
Resistencia de diseño (Proyecto)		f'ck(kg/cm²)	25.0		
Límite inferior – Tracción		f'ck-5 (kg/cm²)	20.0		

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.80

Análisis estadístico resistencia a tracción a los 28 días con 0.70 de Fibra de Vidrio AR - Tolomosa



Fuente: Elaboración propia

Las vigas con 0.026 % de fibra de TOL a 28 días, la resistencia media es de 22.13 kg/cm², con dispersión relativamente alta (CV 14%), lo que refleja variabilidad significativa entre las vigas. La resistencia característica de 19.60 kg/cm² está por debajo del valor de diseño (25 kg/cm²) y ligeramente por debajo del límite mínimo de 20 kg/cm², indicando que, aunque algunas vigas alcanzan valores altos, el desempeño frente a la tracción es inconsistente.

Tabla 3.74

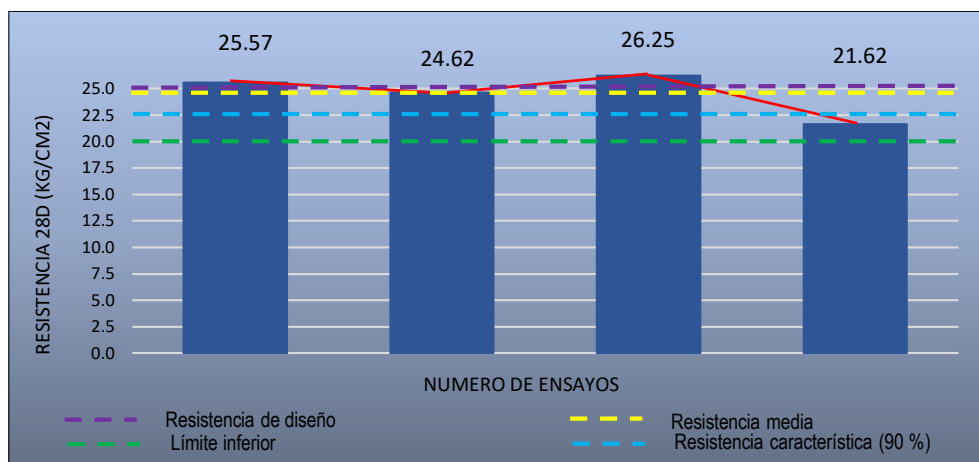
Resistencia a tracción a los 28 días con 0.70 de Fibra de Vidrio AR – San Blas

Dosificación de fibra (kg/m³)	Edad (días)	# de ensayos	Resistencia a (fct) (kg/cm²)	1 criterio (Media móvil ≥ f'ck)	2 criterio (Ensayo individual ≥ f'ck-5)
V1-SBL-0.70	28	1	25.57	CUMPLE	CUMPLE
V2-SBL-0.70	28	2	24.62		CUMPLE
V3-SBL-0.70	28	3	26.25	NO CUMPLE	CUMPLE
V4-SBL-0.70	28	4	21.62		CUMPLE
Resistencia media		f(kg/cm²)	24.51		
Cantidad de datos		N°	4		
Varianza muestral		S²(kg/cm²)²	4.16		
Desviación estándar		S (kg/cm²)	2.04		
Coeficiente de variación		CV (%)	8.3		
Grado de control		Excelente			
Grados de libertad		gl	3		
Nivel de significancia		α	0.10		
Coeficiente t (Student)		t	1.64		
Resistencia característica (90 %)		fck(kg/cm²)	21.17		
Resistencia de diseño (Proyecto)		f'ck(kg/cm²)	25.0		
Límite inferior – Tracción		f'ck-5 (kg/cm²)	20.0		

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.81

Análisis estadístico resistencia a tracción a los 28 días con 0.70 de Fibra de Vidrio AR - San Blas



Fuente: Elaboración propia

En las vigas con 0.026 % de fibra de SBL a 28 días, la resistencia media fue de 24.51 kg/cm², con dispersión moderada (CV 8.3%) entre los ensayos. La resistencia característica de 22.84 kg/cm² queda por debajo del valor de diseño (25 kg/cm²), aunque supera el límite mínimo de 20 kg/cm², lo que indica que el material tiene un desempeño razonable y consistente, pero aún no alcanza completamente la tracción requerida por el proyecto.

Tabla 3.75

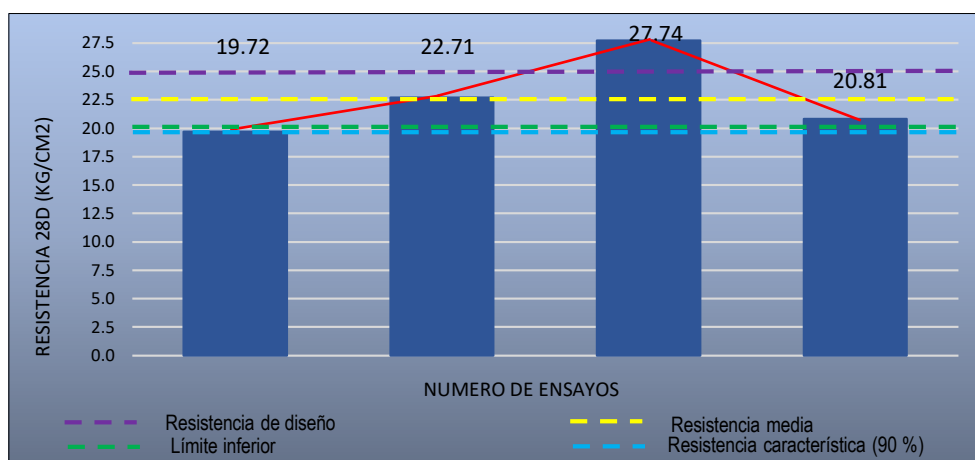
Resistencia a tracción a los 28 días con 0.70 de Fibra de Vidrio AR – La Choz

Dosificación de fibra (kg/m³)	Edad (días)	# de ensayos	Resistencia a (fct) (kg/cm²)	1 criterio (Media móvil ≥ f'ck)	2 criterio (Ensayo individual ≥ f'ck-5)
V1-CHZ-0.70	28	1	19.72	NO CUMPLE	NO CUMPLE
V2-CHZ-0.70	28	2	22.71		CUMPLE
V3-CHZ-0.70	28	3	27.74	NO CUMPLE	CUMPLE
V4-CHZ-0.70	28	4	20.81		CUMPLE
Resistencia media		f(kg/cm²)	22.75		
Cantidad de datos		Nº	4		
Varianza muestral		S²(kg/cm²)²	12.63		
Desviación estándar		S (kg/cm²)	3.55		
Coeficiente de variación		CV (%)	15.6		
Grado de control		Bueno			
Grados de libertad		gl	3		
Nivel de significancia		α	0.10		
Coeficiente t (Student)		t	1.64		
Resistencia característica (90 %)		fck(kg/cm²)	16.92		
Resistencia de diseño (Proyecto)		f'ck(kg/cm²)	25.0		
Límite inferior – Tracción		f'ck-5 (kg/cm²)	20.0		

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.82

Análisis estadístico resistencia a tracción a los 28 días con 0.70 de Fibra de Vidrio AR - La Choz



Fuente: Elaboración propia

En las vigas con 0.026 % de fibra de CHZ a 28 días, la resistencia media fue de 22.75 kg/cm², pero con alta variabilidad entre ensayos (CV 15.6%), lo que refleja resultados muy dispersos. La resistencia característica de 19.84 kg/cm² queda por debajo del valor de diseño (25 kg/cm²) y del límite mínimo de 20 kg/cm², indicando al frente a la tracción es irregular y el material no garantiza la seguridad estructural requerida.

Tabla 3.77

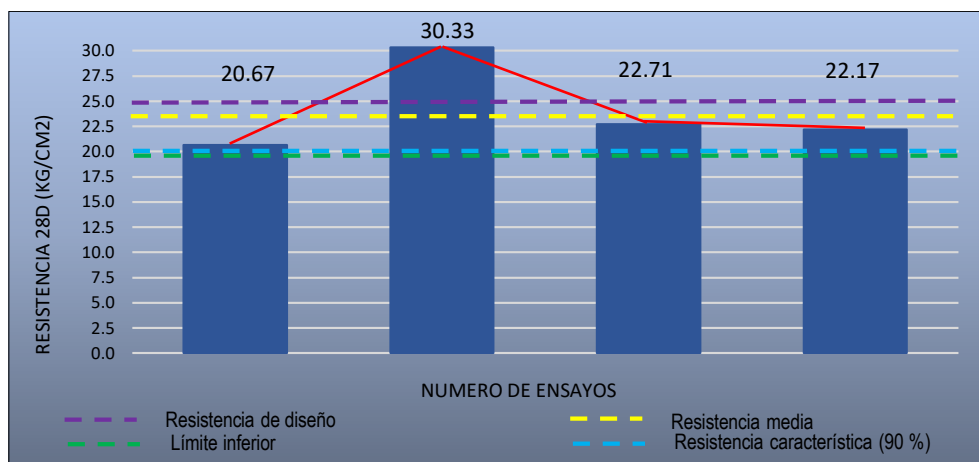
Resistencia a tracción a los 28 días con 1.00 de Fibra de Vidrio AR - Tolomosa

Dosificación de fibra (kg/m³)	Edad (días)	# de ensayos	Resistencia a (fct) (kg/cm²)	1 criterio (Media móvil ≥ f'ck)	2 criterio (Ensayo individual ≥ f'ck-5)
V1-TOL-1.00	28	1	20.67	NO CUMPLE	CUMPLE
V2-TOL-1.00	28	2	30.33		CUMPLE
V3-TOL-1.00	28	3	22.71	CUMPLE	CUMPLE
V4-TOL-1.00	28	4	22.17		CUMPLE
Resistencia media		f(kg/cm²)	23.97		
Cantidad de datos		N°	4		
Varianza muestral		S²(kg/cm²)²	18.71		
Desviación estándar		S (kg/cm²)	4.33		
Coeficiente de variación		CV (%)	18.0		
Grado de control		Regular			
Grados de libertad		gl	3		
Nivel de significancia		α	0.10		
Coeficiente t (Student)		t	1.64		
Resistencia característica (90 %)		fck(kg/cm²)	16.88		
Resistencia de diseño (Proyecto)		f'ck(kg/cm²)	25.0		
Límite inferior – Tracción		f'ck-5 (kg/cm²)	20.0		

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.83

Análisis estadístico resistencia a tracción a los 28 días con 1.00 de Fibra de Vidrio AR - Tolomosa



Fuente: Elaboración propia

En las vigas con 0.037 % de fibra de TOL a 28 días, la resistencia media fue de 23.97 kg/cm², pero presenta alta dispersión entre ensayos (CV 18%), lo que indica resultados muy inconsistentes. La resistencia característica de 20.43 kg/cm² queda por debajo del valor de diseño (25 kg/cm²) aunque supera ligeramente el límite mínimo de 20 kg/cm², mostrando que algunas vigas logran buena tracción, pero en general el lote es irregular y no garantiza un desempeño uniforme.

Tabla 3.76

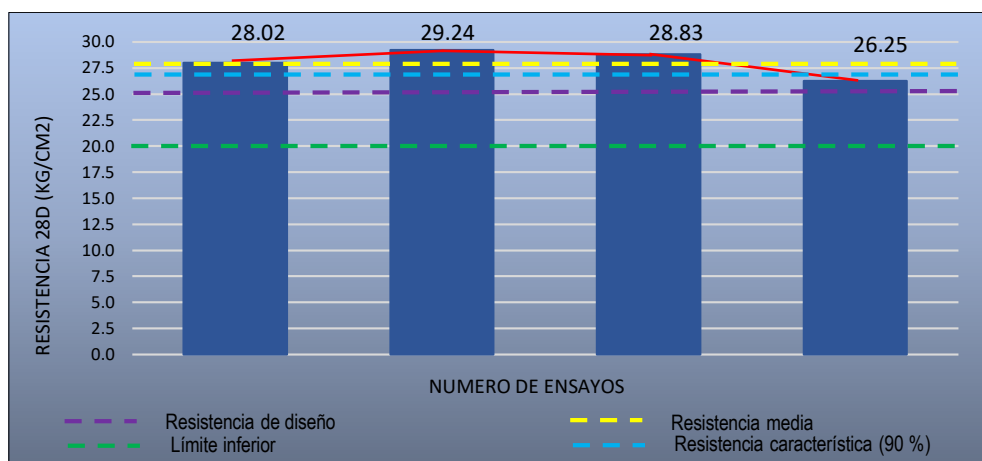
Resistencia a tracción a los 28 días con 1.00 de Fibra de Vidrio AR – San Blas

Dosificación de fibra (kg/m³)	Edad (días)	# de ensayos	Resistencia a (fct) (kg/cm²)	1 criterio (Media móvil ≥ f'ck)	2 criterio (Ensayo individual ≥ f'ck-5)
V1-SBL-1.00	28	1	28.02	CUMPLE	CUMPLE
V2-SBL-1.00	28	2	29.24		CUMPLE
V3-SBL-1.00	28	3	28.83	CUMPLE	CUMPLE
V4-SBL-1.00	28	4	26.25		CUMPLE
Resistencia media		f(kg/cm²)	28.08		
Cantidad de datos		N°	4		
Varianza muestral		S²(kg/cm²)²	1.76		
Desviación estándar		S (kg/cm²)	1.33		
Coeficiente de variación		CV (%)	4.7		
Grado de control		Excelente			
Grados de libertad		gl	3		
Nivel de significancia		α	0.10		
Coeficiente t (Student)		t	1.64		
Resistencia característica (90 %)		fck(kg/cm²)	25.91		
Resistencia de diseño (Proyecto)		f'ck(kg/cm²)	25.0		
Límite inferior – Tracción		f'ck-5 (kg/cm²)	20.0		

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.84

Análisis estadístico resistencia a tracción a los 28 días con 1.00 de Fibra de Vidrio AR - San Blas



Fuente: Elaboración propia

En las vigas con 0.037 % de fibra de SBL a 28 días, la resistencia media fue de 28.08 kg/cm², con muy baja dispersión (CV 4.7%), indicando resultados consistentes y uniformes. La resistencia característica de 27.00 kg/cm² supera el valor de diseño (25 kg/cm²) y ampliamente el límite mínimo de 20 kg/cm², lo que evidencia que el lote tiene un desempeño excelente frente a la tracción.

Tabla 3.77

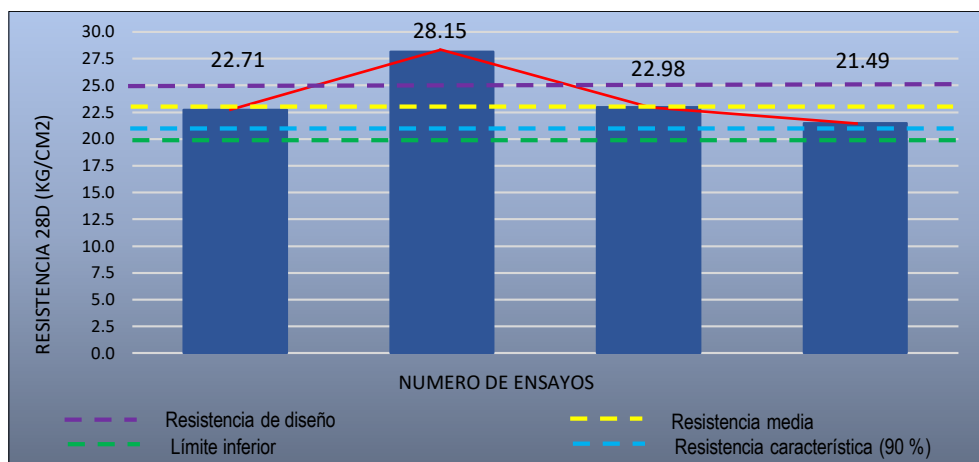
Resistencia a tracción a los 28 días con 1.00 de Fibra de Vidrio AR – La Choz

Dosificación de fibra (kg/m³)	Edad (días)	# de ensayos	Resistencia a (fct) (kg/cm²)	1 criterio (Media móvil ≥ f'ck)	2 criterio (Ensayo individual ≥ f'ck-5)
V1-CHZ-1.00	28	1	22.71	NO CUMPLE	CUMPLE
V2-CHZ-1.00	28	2	28.15		CUMPLE
V3-CHZ-1.00	28	3	22.98	NO CUMPLE	CUMPLE
V4-CHZ-1.00	28	4	21.49		CUMPLE
Resistencia media		f(kg/cm²)	23.83		
Cantidad de datos		N°	4		
Varianza muestral		S²(kg/cm²)²	8.71		
Desviación estándar		S (kg/cm²)	2.95		
Coeficiente de variación		CV (%)	12.4		
Grado de control		Muy bueno			
Grados de libertad		gl	3		
Nivel de significancia		α	0.10		
Coeficiente t (Student)		t	1.64		
Resistencia característica (90 %)		fck(kg/cm²)	19.00		
Resistencia de diseño (Proyecto)		f'ck(kg/cm²)	25.0		
Límite inferior – Tracción		f'ck-5 (kg/cm²)	20.0		

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.85

Análisis estadístico resistencia a tracción a los 28 días con 1.00 de Fibra de Vidrio AR - La Choz



Fuente: Elaboración propia

En las vigas con 0.037 % de fibra de CHZ a 28 días, la resistencia media fue de 23.83 kg/cm², con dispersión moderada (CV 12.4%), lo que indica cierta variabilidad entre los ensayos. La resistencia característica de 21.42 kg/cm² está por debajo del valor de diseño (25 kg/cm²) pero por encima del límite mínimo de 20 kg/cm², mostrando que el lote tiene un desempeño aceptable y consistente, aunque no alcanza completamente los requerimientos de tracción del proyecto.

Tabla 3.78

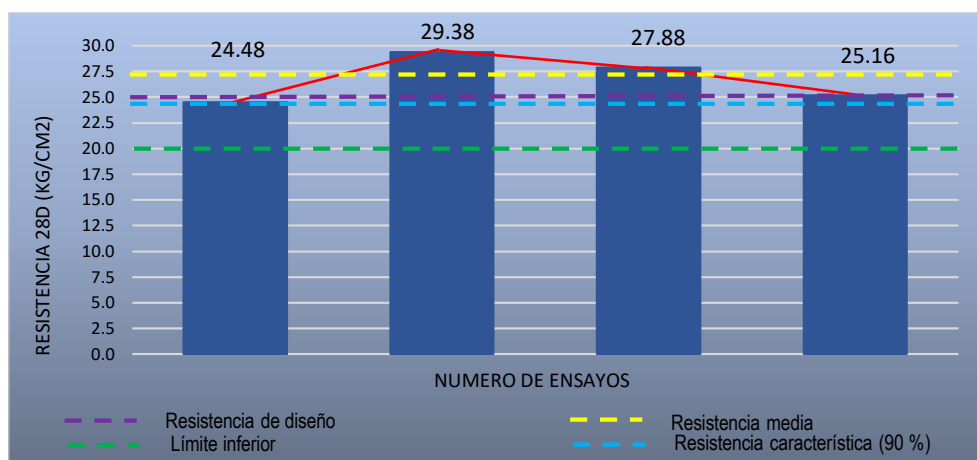
Resistencia a tracción a los 28 días con 1.30 de Fibra de Vidrio AR - Tolomosa

Dosificación de fibra (kg/m³)	Edad (días)	# de ensayos	Resistencia a (fct) (kg/cm²)	1 criterio (Media móvil ≥ f'ck)	2 criterio (Ensayo individual ≥ f'ck-5)
V1-TOL-1.30	28	1	24.48	CUMPLE	CUMPLE
V2-TOL-1.30	28	2	29.38		CUMPLE
V3-TOL-1.30	28	3	27.88	CUMPLE	CUMPLE
V4-TOL-1.30	28	4	25.16		CUMPLE
Resistencia media		f(kg/cm²)	26.72		
Cantidad de datos		N°	4		
Varianza muestral		S²(kg/cm²)²	5.28		
Desviación estándar		S (kg/cm²)	2.30		
Coeficiente de variación		CV (%)	8.6		
Grado de control		Excelente			
Grados de libertad		gl	3		
Nivel de significancia		α	0.10		
Coeficiente t (Student)		t	1.64		
Resistencia característica (90 %)		fck(kg/cm²)	22.96		
Resistencia de diseño (Proyecto)		f'ck(kg/cm²)	25.0		
Límite inferior – Tracción		f'ck-5 (kg/cm²)	20.0		

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.86

Análisis estadístico resistencia a tracción a los 28 días con 1.30 de Fibra de Vidrio AR - Tolomosa



Fuente: Elaboración propia

En las vigas con 0.049 % de fibra de TOL a 28 días, la resistencia media fue de 26.72 kg/cm², con dispersión moderada (CV 8.6%), mostrando resultados consistentes. La resistencia característica de 24.84 kg/cm² está muy cerca del valor de diseño (25 kg/cm²) y supera ampliamente el límite mínimo de 20 kg/cm², indicando que el lote tiene un desempeño confiable y adecuado frente a la tracción.

Tabla 3.79

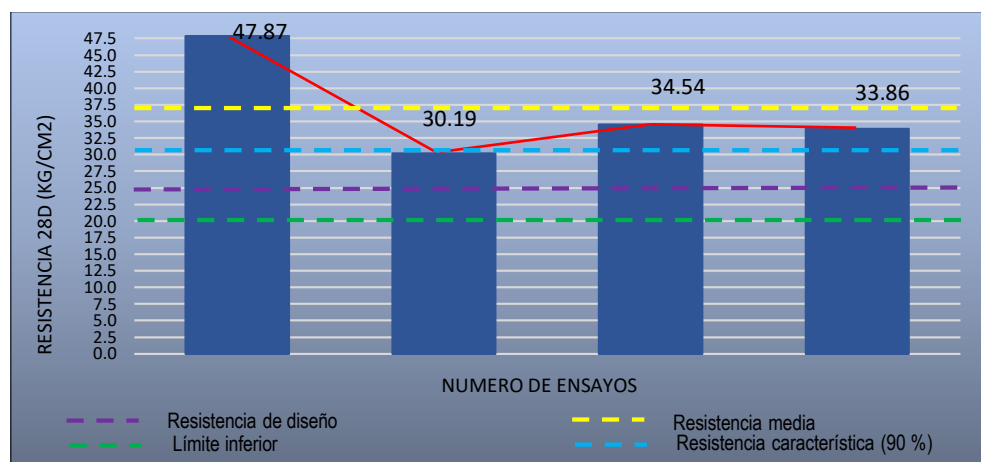
Resistencia a tracción a los 28 días con 1.30 de Fibra de Vidrio AR – San Blas

Dosificación de fibra (kg/m³)	Edad (días)	# de ensayos	Resistencia a (fct) (kg/cm²)	1 criterio (Media móvil ≥ f'ck)	2 criterio (Ensayo individual ≥ f'ck-5)
V1-SBL-1.30	28	1	47.87	CUMPLE	CUMPLE
V2-SBL-1.30	28	2	30.19		CUMPLE
V3-SBL-1.30	28	3	34.54	CUMPLE	CUMPLE
V4-SBL-1.30	28	4	33.86		CUMPLE
Resistencia media		f(kg/cm²)	36.62		
Cantidad de datos		N°	4		
Varianza muestral		S²(kg/cm²)²	59.94		
Desviación estándar		S (kg/cm²)	7.74		
Coeficiente de variación		CV (%)	21.1		
Grado de control		Malo			
Grados de libertad		gl	3		
Nivel de significancia		α	0.10		
Coeficiente t (Student)		t	1.64		
Resistencia característica (90 %)		fck(kg/cm²)	23.94		
Resistencia de diseño (Proyecto)		f'ck(kg/cm²)	25.0		
Límite inferior – Tracción		f'ck-5 (kg/cm²)	20.0		

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.87

Análisis estadístico resistencia a tracción a los 28 días con 1.30 de Fibra de Vidrio AR - San Blas



Fuente: Elaboración propia

En las vigas con 0.049 % de fibra de SBL a 28 días, la resistencia media fue de 36.62 kg/cm², pero con alta dispersión entre ensayos (CV 21.1%), lo que indica resultados muy irregulares. La resistencia característica de 30.28 kg/cm² supera el valor de diseño (25 kg/cm²) y el límite mínimo (20 kg/cm²), mostrando que, aunque algunas vigas alcanzan muy alta resistencia, la variabilidad del lote es considerable, lo que compromete la uniformidad y confiabilidad del material.

Tabla 3.80

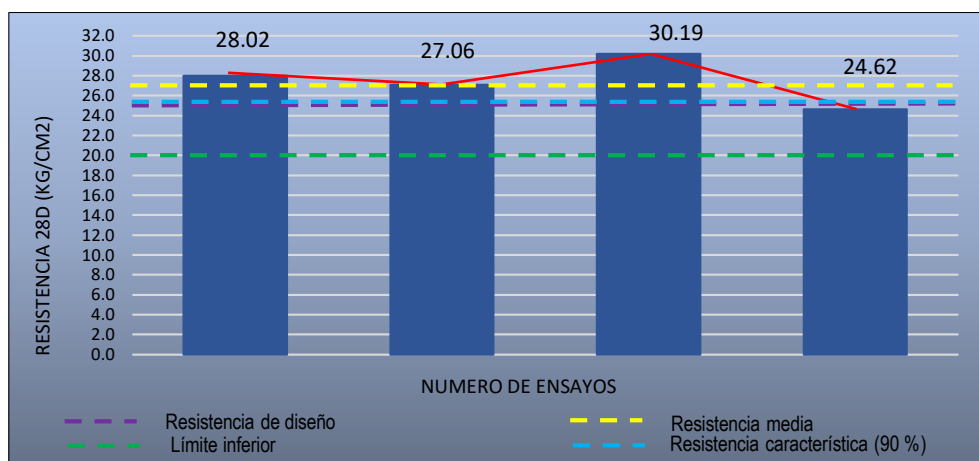
Resistencia a tracción a los 28 días con 1.30 de Fibra de Vidrio AR – La Choz

Dosificación de fibra (kg/m³)	Edad (días)	# de ensayos	Resistencia a (fct) (kg/cm²)	1 criterio (Media móvil ≥ f'ck)	2 criterio (Ensayo individual ≥ f'ck-5)
V1-CHZ-1.30	28	1	28.02	CUMPLE	CUMPLE
V2-CHZ-1.30	28	2	27.06		CUMPLE
V3-CHZ-1.30	28	3	30.19	CUMPLE	CUMPLE
V4-CHZ-1.30	28	4	24.62		CUMPLE
Resistencia media		f(kg/cm²)	27.47		
Cantidad de datos		Nº	4		
Varianza muestral		S²(kg/cm²)²	5.34		
Desviación estándar		S (kg/cm²)	2.31		
Coeficiente de variación		CV (%)	8.4		
Grado de control		Excelente			
Grados de libertad		gl	3		
Nivel de significancia		α	0.10		
Coeficiente t (Student)		t	1.64		
Resistencia característica (90 %)		fck(kg/cm²)	23.69		
Resistencia de diseño (Proyecto)		f'ck(kg/cm²)	25.0		
Límite inferior – Tracción		f'ck-5 (kg/cm²)	20.0		

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.88

Análisis estadístico resistencia a tracción a los 28 días con 1.30 de Fibra de Vidrio AR - La Choz



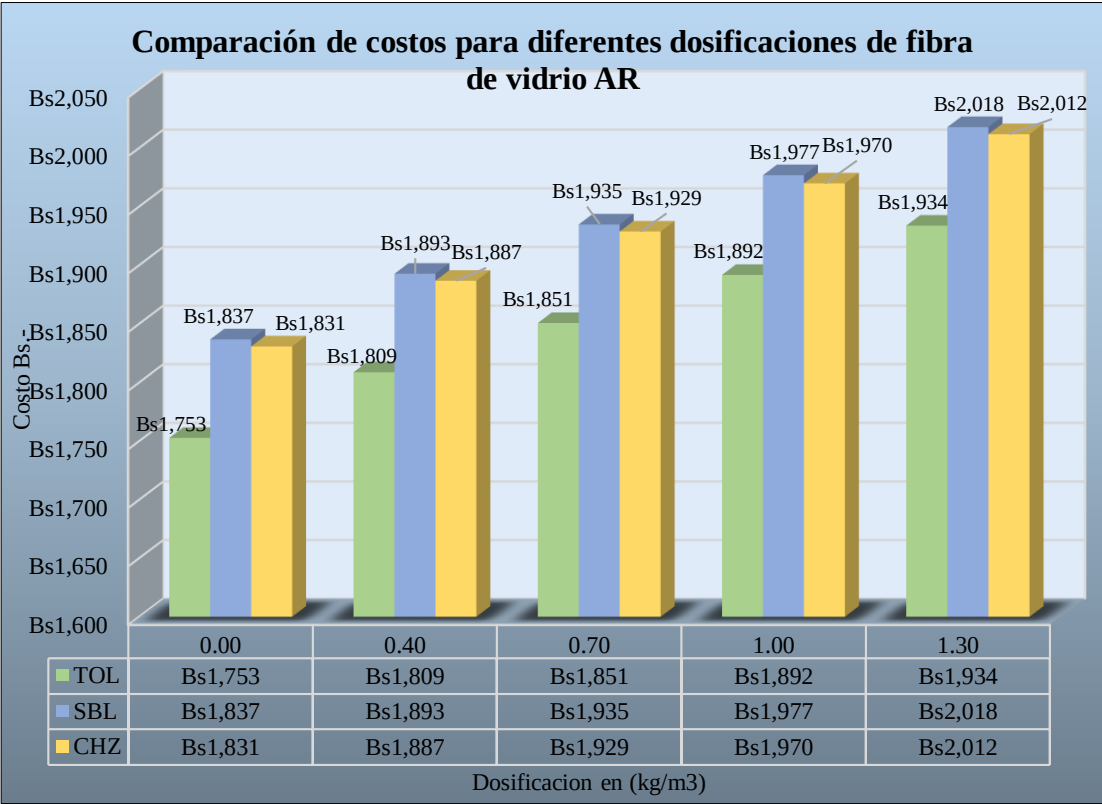
Fuente: Elaboración propia

En las vigas con 0.049 % de fibra de CHZ a 28 días, la resistencia media fue de 27.47 kg/cm², con baja dispersión (CV 8.4%), mostrando resultados consistentes entre las vigas. La resistencia característica de 25.58 kg/cm² supera el valor de diseño (25 kg/cm²) y el límite mínimo de 20 kg/cm², indicando que el lote tiene un desempeño confiable y adecuado frente a la tracción.

3.15 Análisis de Costos.

Para este análisis, se tomaron como referencia los costos de materiales según los valores obtenidos en la Revista PL Presupuestos y Construcción, N.º 80 (marzo agosto 2025). En la Figura N° 3.89, se presenta la comparación de costos para distintas dosificaciones de fibra de vidrio AR (0.00-0.40-0.70-1.00 y 1.30) kg/m³ en los tres tipos de hormigón evaluados: TOL, SBL y CHZ.

Figura 3.89
Comparación de costos



Fuente: Elaboración propia

Los resultados muestran una tendencia creciente en los costos a medida que se incrementa el contenido de fibra. Para el caso del hormigón TOL, el costo aumenta de 1.753,00 Bs (sin fibra) a 1.934,00 Bs (con 1.30 de fibra). De manera similar, el SBL pasa de 1.837,00 Bs a 2.018,00 Bs, y el CHZ de 1.831,00 Bs a 2.012,00 Bs. Esta tendencia evidencia que la adición de fibra de vidrio AR conlleva un incremento progresivo en el costo total de la mezcla.

Sin embargo, el aumento de costos es relativamente moderado y puede justificarse por las mejoras en el desempeño del hormigón, especialmente en la resistencia a la fisuración por retracción plástica, durabilidad y mantenimiento de la estructural frente a cambios térmicos o de humedad. Entre los tres tipos de hormigón, el TOL presenta los costos más bajos en todas las dosificaciones de fibra, mientras que el CHZ es el de mayor costo, posiblemente por la mayor demanda de materiales o por la variación en la dosificación de agregados y cemento.

Tabla 3.82

Análisis Costo-Beneficio

Dosificación de fibra (kg/m ³)	TOLOMOSA		
	Costo (Bs/m ³)	Incremento (%)	Costo Adicional (Bs/m ³)
0.00	1753.00	-	
0.40	1809.00	3.19	56.00
0.70	1851.00	5.59	98.00
1.00	1892.00	7.93	139.00
1.30	1934.00	10.33	181.00
Dosificación de fibra (kg/m ³)	SAN BLAS		
	Costo (Bs/m ³)	Incremento (%)	Costo Adicional (Bs/m ³)
0.00	1837.00	-	
0.40	1893.00	3.05	56.00
0.70	1935.00	5.33	98.00
1.00	1977.00	7.62	140.00
1.30	2018.00	9.85	181.00
Dosificación de fibra (kg/m ³)	LA CHOZA		
	Costo (Bs/m ³)	Incremento (%)	Costo Adicional (Bs/m ³)
0.00	1831.00	-	
0.40	1887.00	3.06	56.00
0.70	1929.00	5.35	98.00
1.00	1970.00	7.59	139.00
1.30	2012.00	9.89	181.00

Fuente: Elaboración propia

El análisis considera los precios de los insumos (cemento, agregados, agua y fibra), así como la mano de obra y los equipos, manteniendo las mismas condiciones de incidencia para todos los casos. Los cálculos detallados y los análisis de precios unitarios correspondientes se presentan en el Anexo IX.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

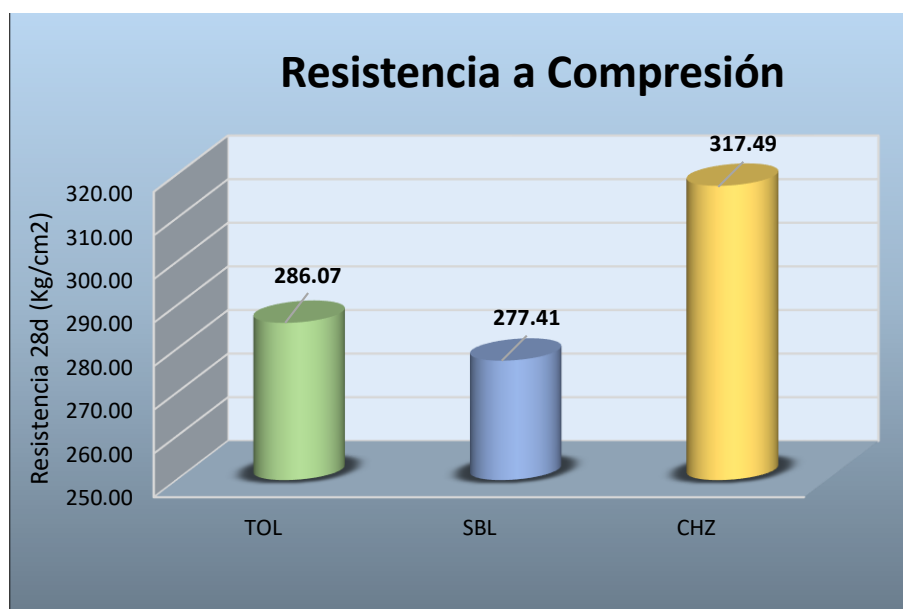
4.1 Interpretación del Ensayo de Resistencia a Compresión y Tracción.

- **Resistencia a Compresión**

Los resultados obtenidos muestran que el agregado La Choza, de tipo canto rodado natural, alcanzó la mayor resistencia media (317.49 kg/cm^2), seguido por Tolomosa (286.07 kg/cm^2) y San Blas (277.41 kg/cm^2).

Figura 4. 1

Comparación de resistencias a Compresión de vigas a los 28 días.



Fuente: Elaboración propia

Una buena compactación de las partículas del árido de La Choza explica su comportamiento sobresaliente en compresión, ya que estos factores reducen la porosidad y mejoran la continuidad estructural de la mezcla. En contraste, los áridos triturados de Tolomosa y San Blas, aunque se adhieren mejor al cemento, tienen menor densidad compactada, lo que reduce ligeramente su resistencia promedio.

La mayor resistencia de La Choza se explica por un mayor grado de compactación y mejor curva granulométrica efectiva para conseguir una matriz con menos vacíos. Para elementos en los que la capacidad portante y la rigidez a compresión sean determinantes (cimientos, zapatas, columnas), La Choza muestra la mayor resistencia

media (317 kg/cm²) y la mayor densidad compactada (1.637), lo que sugiere una granulometría máxima que permite un acomodo de partículas más eficiente y una matriz con menor porosidad. El CV ~ 5.6% indica resultados homogéneos y control de calidad adecuado constituye la opción más favorable desde el punto de vista puramente resistente. Desde un punto de vista técnico, el canto rodado natural favorece el acomodo de las partículas y genera una mezcla más compacta, incrementando la capacidad portante del hormigón, por lo que se considera óptimo para elementos estructurales sometidos a compresión, tales como zapatas, columnas o muros portantes.

- **Resistencia a tracción**

En los ensayos de tracción por flexión se observó una tendencia creciente de la resistencia conforme aumentó el contenido de fibra. Considerando únicamente el efecto del tipo de agregado:

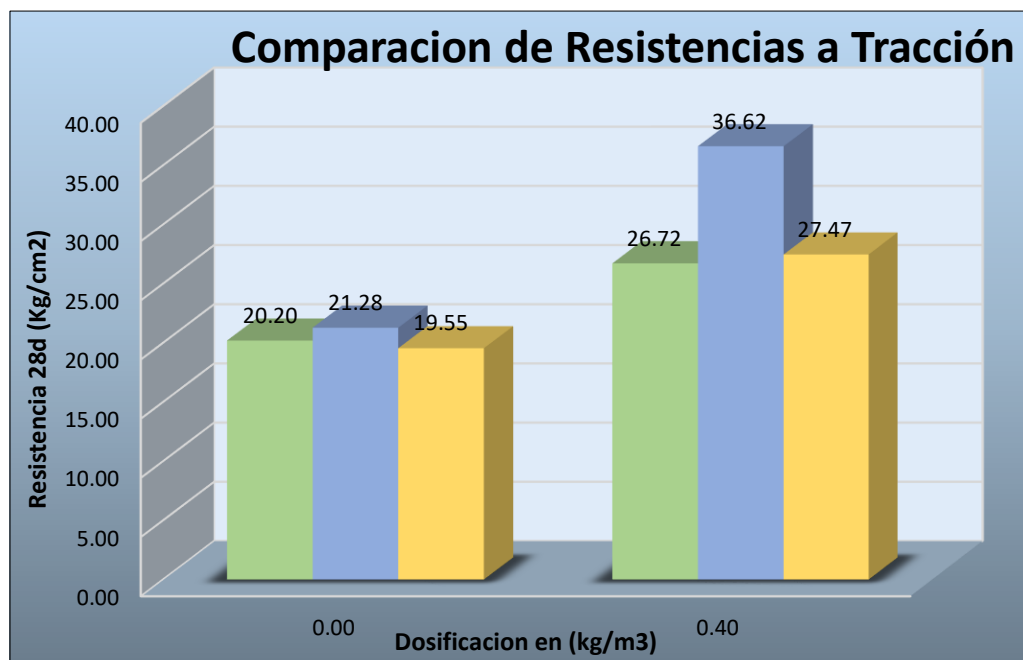
- ✓ **Sin fibra 0.00:** Tolomosa = 20.20 kg/cm², San Blas = 21.28 kg/cm², La Choza = 19.55 kg/cm².
- ✓ **Con 1.30 de fibra:** Tolomosa = 26.72 kg/cm², San Blas = 36.62 kg/cm², La Choza = 27.47 kg/cm².

Estos resultados evidencian que el agregado San Blas (triturado) obtuvo la mayor resistencia a tracción, destacando sobre los otros bancos, especialmente al combinarse con la fibra de vidrio. La textura angular del árido chancado favorece la adherencia de la pasta árido y mejora la transferencia de esfuerzos, potenciando el efecto de puenteo de la fibra y el comportamiento del hormigón.

La viga de San Blas con 1.30 de fibra (SBL) alcanzó 36.62 kg/cm², mucho más que las demás. Esto se debió a que el árido angular permitió un mejor anclaje, la mezcla quedó bien compacta y la fibra se acumuló en algunas zonas, aumentando la resistencia. Aunque mejoró la capacidad de carga, refleja una distribución irregular de la fibra.

Figura 4. 2

Comparación de resistencias a tracción de vigas a los 28 días.



Fuente: Elaboración propia

Los resultados demuestran que:

- **La Chozza (canto rodado):** mayor resistencia a compresión, excelente densidad tanto como su distribución y ajuste de partículas dentro de la masa del hormigón.
- **San Blas (triturado):** mejor resistencia a tracción, gracias a su adherencia superior y geometría angular.
- **Tolomosa:** comportamiento equilibrado entre ambas resistencias, adecuado para aplicaciones mixtas.

4.2 Interpretación del Ensayo de Índice de fisuración por Retracción Plástica.

Los ensayos realizados según la norma ASTM C1579 demostraron que la fibra de vidrio AR reduce de manera significativa la fisuración por retracción plástica en las losas de hormigón. En la Tabla 4.1 se observa cómo el ancho promedio de fisuras disminuye progresivamente a medida que aumenta la dosificación de fibra, alcanzando hasta un 85,05 % de reducción respecto al panel patrón, que presentó un ancho máximo de 0,555 mm.

Este comportamiento se explica por el efecto de puenteo (“bridging effect”) de las fibras, que distribuyen las tensiones internas y limitan la propagación de microfisuras. Además, se evidenció que el tipo de agregado influye en la respuesta del hormigón, ya que sus propiedades físicas y granulométricas afectan la uniformidad de la retracción y la formación de fisuras.

- **Agregado Tolomosa:** Tuvo el mejor desempeño general. En la mezcla con 1.30 kg/m³ de fibra, el ancho promedio de fisura se redujo hasta 0,062 mm. Su granulometría continua y baja absorción favorecieron una buena unión entre cemento y árido, logrando una retracción más uniforme.
- **Agregado San Blas:** Mostró un comportamiento intermedio, con fisuras más finas que las de La Chozza, aunque con resultados algo variables. Su contenido medio de finos permitió un desempeño aceptable, aunque con fisuras ligeramente mayores que las de Tolomosa.
- **Agregado La Chozza:** Fue el que más se fisuró, debido a su granulometría discontinua y alta absorción. Estas condiciones provocaron una mayor pérdida de humedad superficial y un aumento en la cantidad y longitud de fisuras.

Los paneles elaborados con el agregado de Tolomosa y con dosificaciones de fibra entre (1.00 y 1.30) kg/m³ fueron los que mostraron menos fisuras por retracción plástica. Esto demuestra que esta combinación es la más eficiente tanto en el aspecto técnico como estructural.

Además, el uso de fibra de vidrio AR mejoró notablemente el comportamiento del hormigón frente a la retracción plástica. Su efecto fue aún más evidente cuando se

utilizaron agregados con buena granulometría y baja absorción, como los provenientes de Tolomosa.

Tabla 4. 1

Ancho Promedio de Fisuras

Tipo de Hormigón	Ancho promedio de fisura (mm)		
	TOL	SBL	CHZ
0.00	0.75	0.56	0.61
0.40	0.48	0.46	0.48
0.70	0.27	0.35	0.39
1.00	0.07	0.07	0.20
1.30	0.06	0.06	0.09

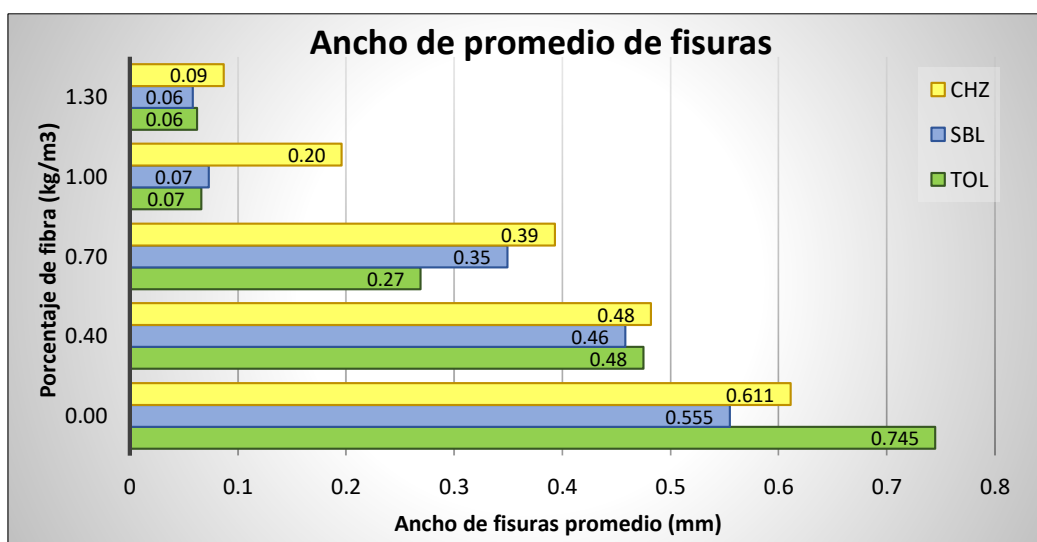
Fuente: Elaboración propia

Después de 24 horas se midieron los anchos de fisura promedio. Se pudo notar con claridad que las muestras reforzadas con fibra de vidrio AR tuvieron fisuras mucho más delgadas en comparación con las muestras patrón.

En las Figuras 4.3 se observa que, a medida que aumenta la cantidad de microfibra en la mezcla, las fisuras se vuelven más estrechas. Este comportamiento muestra que las fibras realmente ayudan a controlar la apertura de las grietas, logrando que el hormigón mantenga una mejor cohesión superficial.

Figura 4. 3

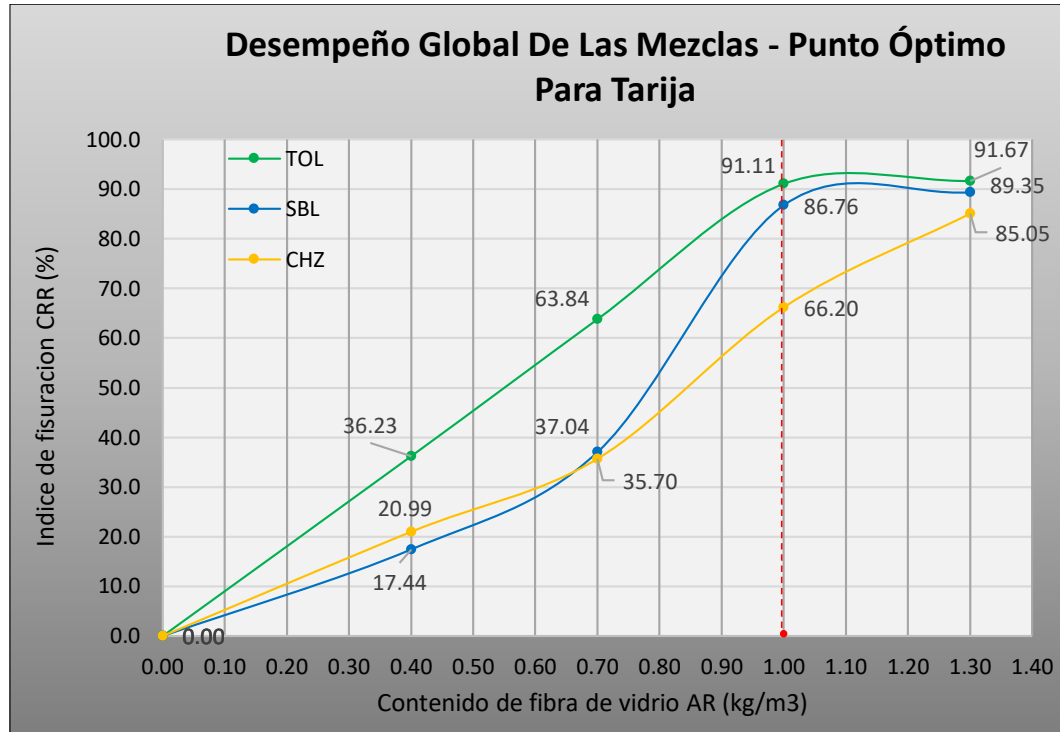
Comparación de anchos de fisuras.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4. 4

Efecto de la fibra de vidrio AR en la fisuración de hormigón con diferentes agregados



Fuente: Elaboración propia

En la figura, se ve cómo cambia el CRR (%) al agregar fibra de vidrio AR a las mezclas con los tres agregados: Tolomosa, San Blas y La Chozza.

En general, se nota que añadir fibra mejora el resultado. Las grietas que aparecen son más pequeñas y menos numerosas. En otras palabras, el hormigón se comporta mejor frente a la retracción plástica cuando tiene fibra.

Tolomosa con solo 1.30 de fibra, el CRR llega al 91 %. San Blas queda un poco atrás, a 87 %, y La Chozza está bastante más abajo, alrededor del 66 %.

El punto óptimo está en 1.00 kg/m³ de fibra, que está marcado en la figura con la línea roja discontinua. Más fibra no cambia mucho los resultados y además puede complicar un poco la trabajabilidad de la mezcla. Por eso, esa dosificación se ve como el más adecuado para Tarija.

CAPÍTULO V
CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES

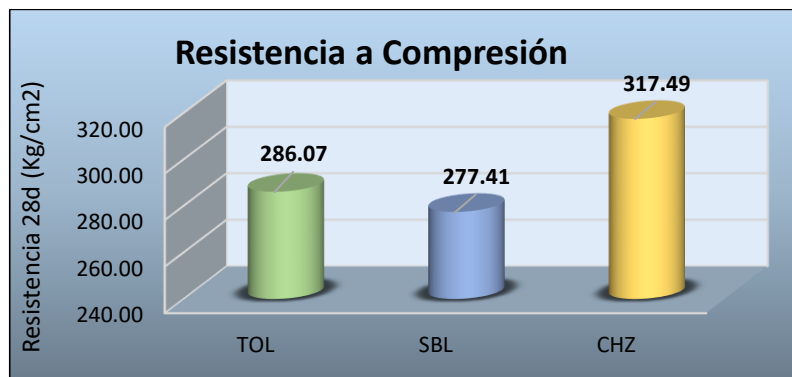
CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Los agregados provenientes de los bancos (Tolomosa, San Blas y La Choza) presentan diferencias tanto en su granulometría, absorción, forma y textura, lo cual influye directamente en el comportamiento mecánico del hormigón.

A partir de los resultados obtenidos mediante los ensayos, se concluye que el agregado procedente de La Choza presentó mayor resistencia a compresión (317,49 kg/cm²), mientras que el agregado de San Blas presentó mejor comportamiento a resistencia a tracción, y Tolomosa mostró características más equilibradas entre ambas propiedades mecánicas, lo que sugiere una adecuada compatibilidad para aplicaciones estructurales donde se requiera un balance entre resistencia y control del índice de fisuración.



- La mezcla patrón diseñada con una resistencia especificada de $f'_{ck} = 250$ kg/cm² cumplió adecuadamente con los parámetros de trabajabilidad y resistencia establecidos por el método ACI 211.1. Durante el proceso de elaboración se realizaron controles que permitieron obtener mezclas uniformes, evitando la segregación de los materiales.

Esto fue fundamental para que el hormigón desarrollara la resistencia prevista, alcanzando valores superiores a 250 kg/cm² en compresión, lo que confirma que la dosificación es confiable y adecuada como referencia para determinar la reducción del índice de fisuración por retracción plástica con adición de fibra de vidrio AR.”

- Los resultados del ensayo de resistencia a tracción muestran que la adición de fibra de vidrio AR permitió obtener incrementos de hasta un 30 % en algunos casos, dependiendo del tipo de agregado y la dosificación utilizada.

Las mezclas elaboradas con agregado de San Blas mostraron resultados favorables, donde la dosificación de 1.00 kg/m³ de fibra logró el mejor equilibrio entre trabajabilidad y resistencia, por lo que se considera una alternativa más adecuada dentro de las dosificaciones.

Dosificación de fibra (kg/m ³)	TOLOMOSA		
	Tracción (Kg/cm ²)	Mejora (%)	Evaluación
0.00	20.20	-	-
0.40	22.03	9.09	Moderada
0.70	22.13	9.60	Moderada
1.00	23.97	18.69	Buena
1.30	26.72	32.32	Óptima
Dosificación de fibra (kg/m ³)	SAN BLAS		
	Tracción (Kg/cm ²)	Mejora (%)	Evaluación
0.00	21.28	-	-
0.40	22.20	4.31	Baja
0.70	24.51	15.18	Buena
1.00	28.08	31.95	Óptima
1.30	36.62	72.04	Óptima
Dosificación de fibra (kg/m ³)	LA CHOZA		
	Tracción (Kg/cm ²)	Mejora (%)	Evaluación
0.00	19.55	-	-
0.40	19.92	1.91	Baja
0.70	22.75	16.35	Buena
1.00	23.83	21.91	Óptima
1.30	27.47	40.52	Óptima

- El uso de fibra de vidrio AR permitió reducir el índice de fisuración en las losas sometidas a condiciones ambientales controladas. La reducción máxima obtenida fue de hasta 91.11 % respecto al hormigón patrón, lo que demuestra que la adición de fibra de vidrio AR reduce el índice de fisuración por retracción plástica

Los resultados muestran que la reducción del índice de fisuración aumenta a medida que se incrementa la dosificación de fibra.

Dosificación de fibra (kg/m ³)	TOL	SBL	CHZ
0.00	0.00	0.00	0.00
0.40	36.23	17.44	20.99
0.70	63.84	37.04	35.70
1.00	91.11	86.76	66.20
1.30	91.67	89.35	85.05

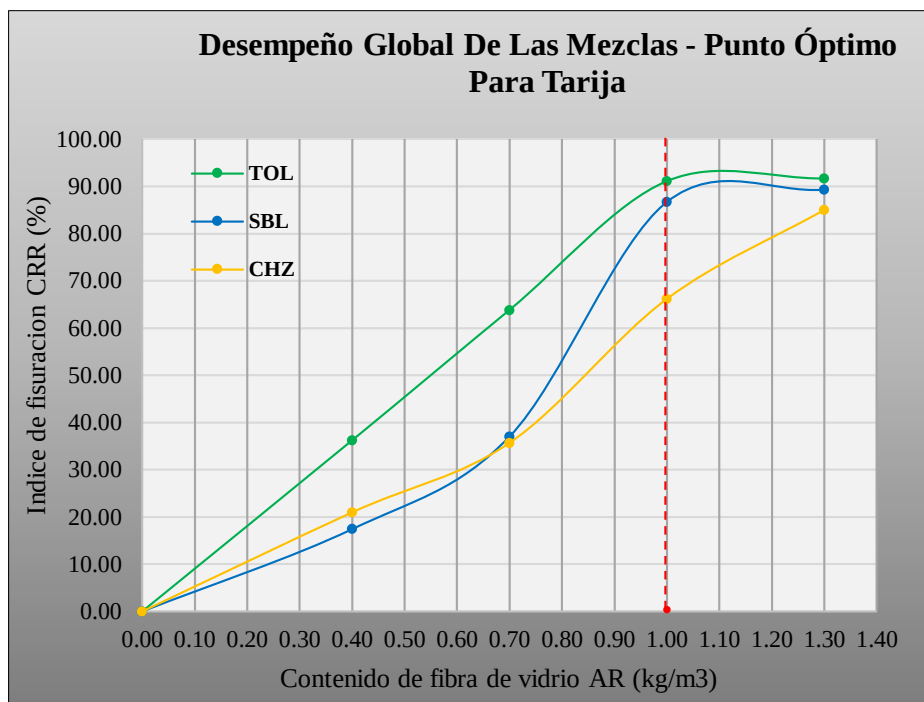
- Las dosificaciones de fibra de vidrio AR evaluadas (0.40, 0.70, 1.00 y 1.30) kg/m³ muestran que valores entre 1.00 y 1.30 kg/m³ representan el mejor equilibrio entre trabajabilidad, resistencia a tracción y control del índice de fisuración.

Equilibrio entre resistencia y fisuración – Punto óptimo

Dosificación de fibra (kg/m ³)	Resistencia (kg/cm ²)			Ancho de fisura (mm)		
	TOL	SBL	CHZ	TOL	SBL	CHZ
0.00	20.20	21.28	19.55	0.75	0.56	0.61
0.40	22.03	22.20	19.92	0.48	0.46	0.48
0.70	22.13	24.51	22.75	0.27	0.35	0.39
1.00	23.97	28.08	23.83	0.07	0.07	0.20
1.30	26.72	36.62	27.47	0.06	0.06	0.09

- La comparación gráfica y estadística confirmó que todas las mezclas con fibra de vidrio AR presentan menores índices de fisuración respecto a la mezcla patrón.

El punto óptimo se observó en la combinación agregado de San Blas con una dosificación de fibra de 1.00 kg/m³, debido a la mayor compacidad de la mezcla y a las adecuadas condiciones de trabajabilidad, lo que permitió reducir el índice de fisuración por retracción plástica.



- El hormigón con fibra de vidrio AR presenta un incremento moderado en el costo de producción respecto al hormigón convencional. De acuerdo con los resultados obtenidos, el aumento varía aproximadamente entre 3 % y 10 %, dependiendo de la dosificación de fibra utilizada.

La reducción del índice de fisuración por retracción plástica obtenida en las mezclas evaluadas permite considerar que su uso resulta técnicamente conveniente, especialmente en elementos donde se requiere un mejor control de la fisuración y una adecuada calidad superficial del hormigón.

Dosificación de fibra (kg/m ³)	TOLOMOSA		
	Costo (Bs/m ³)	Incremento (%)	Costo Adicional (Bs/m ³)
0.00	1753.00	-	
0.40	1809.00	3.19	56.00
0.70	1851.00	5.59	98.00
1.00	1892.00	7.93	139.00
1.30	1934.00	10.33	181.00
Dosificación de fibra (kg/m ³)	SAN BLAS		
	Costo (Bs/m ³)	Incremento (%)	Costo Adicional (Bs/m ³)
0.00	1837.00	-	
0.40	1893.00	3.05	56.00
0.70	1935.00	5.33	98.00
1.00	1977.00	7.62	140.00
1.30	2018.00	9.85	181.00
Dosificación de fibra (kg/m ³)	LA CHOZA		
	Costo (Bs/m ³)	Incremento (%)	Costo Adicional (Bs/m ³)
0.00	1831.00	-	
0.40	1887.00	3.06	56.00
0.70	1929.00	5.35	98.00
1.00	1970.00	7.59	139.00
1.30	2012.00	9.89	181.00

- Los resultados obtenidos en los ensayos realizados muestran que la adición de fibra de vidrio AR mejora el comportamiento del hormigón. Se observó un incremento en la resistencia a tracción y una reducción del índice de fisuración por retracción plástica, siendo la dosificación de 1.00 kg/m³ la que presentó el comportamiento más favorable dentro de las mezclas evaluadas.

A base a estos resultados, se concluye que la hipótesis planteada se cumple, ya que la adición de fibra de vidrio AR aporta mejoras en el comportamiento del hormigón, principalmente con la reducción del índice de fisuración por

retracción plástica y un incremento en la resistencia a tracción, de acuerdo con los resultados obtenidos en el estudio.

5.2 Recomendaciones

- Al momento de verter el hormigón, se debe distribuir la mezcla de manera uniforme y realizar un buen vibrado para evitar que queden vacíos.
- La elaboración del hormigón con fibras no requiere mano de obra especializada, ya que las fibras se incorporan de manera sencilla en la hormigonera. Para asegurar que las fibras se distribuyan de forma uniforme, se debe mezclar el hormigón al menos 3 a 5 minutos después de añadir las fibras de vidrio AR, garantizando así que el material obtenga sus propiedades óptimas.
- Se recomienda emplear agregados del banco Tolomosa, ya que su comportamiento equilibrado favorece una mezcla más estable y con menor tendencia a la fisuración.
- Utilizar la dosificación de 1.00 kg/m^3 de fibra de vidrio AR, ya que representan el punto óptimo entre resistencia mecánica, control de fisuración y costo.
- Es fundamental seguir el procedimiento correcto al pesar los componentes de las mezclas, para reducir variaciones en los resultados y evitar errores durante los ensayos de laboratorio.
- Para elementos sometidos a compresión (cimientos, columnas, muros estructurales), se recomienda utilizar el agregado La Chozas.
- Se recomienda el uso de fibra de vidrio AR en losas, pavimentos y elementos superficiales de hormigón, donde la retracción plástica es más crítica, ya que la adición de fibra de vidrio AR, permite reducir el índice de fisuración y mejorar el comportamiento del material en estado fresco.
- Se recomienda realizar un adecuado proceso de curado en las losas de hormigón, especialmente durante las primeras horas después del vaciado, ya que la pérdida rápida de humedad incrementa el riesgo de fisuración por retracción plástica, incluso cuando se utiliza fibra de vidrio AR.

- No se recomienda utilizar dosificaciones excesivas de fibra de vidrio AR sin un diseño previo de mezcla, ya que cantidades mayores pueden afectar la trabajabilidad del hormigón y dificultar su colocación, sin producir mejoras significativas en el índice de fisuración.
- Se recomienda realizar futuras investigaciones evaluando el comportamiento del hormigón con otros tipos de fibras, con el fin de comparar su efecto en la reducción del índice de fisuración por retracción plástica.
 - ✓ fibras híbridas,
 - ✓ variaciones en el tamaño máximo del agregado,
 - ✓ uso de aditivos reductores de evaporación,
 - ✓ comportamiento en elementos estructurales de mayor espesor.

