

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

**REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE PARA PREDECIR LAS
PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CONCRETO
AUTOCOMPACTANTE EN LA CIUDAD DEL CUSCO, PERIODO 2023**

PRESENTADO POR:

Br. KLISMAN CAHUANA ZAMALLOA

Br. PAOLO CESAR LING VÁSQUEZ HAÑARI

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO CIVIL**

ASESOR:

Ph.D. Ing. AIDA ZAPATA MAR

CUSCO-PERÚ

2025

INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, **Asesor** del trabajo de investigación/tesis titulada: REGRESIÓN LINEAL
MÚLTIPLE PARA PREDECIR LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CONCRETO
AUTOCOMPACTANTE EN LA CIUDAD DEL CUSCO, PERIODO 2023

Presentado por: CAHUANA ZAMALLOA KLISMAN DNI N° 71805975

presentado por: VASQUEZ HANARI PAOLO CESAR LING DNI N°: 70401674

Para optar el título profesional/grado académico de INGENIERO CIVIL

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 02 veces, mediante el Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 2 %.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No se considera plagio.	☒
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las correcciones.	☐
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	☐

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto las primeras páginas del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 16 de JULIO de 2025

Aida Zapata de Camino

Firma

Post firma Ph.D Ing° AIDA ZAPATA MAR.

Nro. de DNI 46939604

ORCID del Asesor 0000-0002-5500-0134

Se adjunta:

- Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
- Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: oid: 27259:474285215

Klisman, Paolo Cahuana, Vasquez

TESIS RLM-SCC-FF.pdf

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:474285215

Fecha de entrega

16 jul 2025, 3:59 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

16 jul 2025, 4:25 p.m. GMT-5

Nombre de archivo

TESIS RLM-SCC-FF.pdf

Tamaño de archivo

16.6 MB

256 Páginas

57.595 Palabras

284.770 Caracteres

2% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 15 palabras)
- Trabajos entregados

Fuentes principales

- 2%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Dedicatoria

A Dios, a mis padres y hermanos que siempre me apoyan y brindan amor incondicionalmente a pesar de que les saque una que otra cana del pelo, a mis sobrinos, a mi tía esperando su pronta recuperación y mis primos quienes siempre me sacaron una sonrisa, a mi querida paloma quien me enseñó a sonreír a pesar de que el día esté nublado y a mis amigos quienes me ayudaron y estuvieron conmigo.

Paolo Cesar Ling Vásquez Hañari

A Dios, a la memoria de mi hermana Miraya, cuya partida dejó un vacío profundo, pero también una huella imborrable de amor, fortaleza e inspiración.

A mis padres por su amor incondicional, sacrificio y guía constante. A mi hermano, por su apoyo y cercanía. Y a mis amigos, por su ayuda y compañía a lo largo de este proceso.

Klisman Cahuana Zamalloa

Resumen

La presente investigación tiene como objetivo principal desarrollar un modelo de predicción de la resistencia (compresión y flexión) del concreto autocompactante a partir de sus componentes (cemento, agua, agregados y aditivo), utilizando la técnica estadística de regresión lineal múltiple. Este modelo busca optimizar el diseño de mezclas, reduciendo la necesidad de extensas pruebas experimentales en laboratorio. El estudio se enmarca en un enfoque cuantitativo, experimental y aplicado, centrado en analizar el comportamiento mecánico del concreto autocompactante en función de su dosificación.

Se formularon seis diseños experimentales de mezcla de concreto autocompactante, en los cuales se variaron intencionalmente las proporciones de los materiales constituyentes. Las mezclas desarrolladas se encuentran dentro de los rangos de asentamiento especificados por la norma ACI 237R-07. La verificación de las propiedades de autocompactabilidad se llevó a cabo mediante los ensayos de capacidad de paso (L-Box), capacidad de llenado (V-funnel) y la resistencia a la segregación (Slump Flow). Todos los procedimientos experimentales se ejecutaron conforme a las directrices establecidas por la EFNARC y la ACI 237R-07, tanto para el diseño de mezclas como para la evaluación de la autocompactabilidad del concreto.

Los datos obtenidos de los ensayos de resistencia a la compresión y a la flexión fueron procesados y analizados utilizando el software Minitab, mediante la aplicación de modelos de regresión lineal múltiple. En este análisis se evaluaron indicadores estadísticos esenciales, como el coeficiente de determinación (R^2), los valores p y el factor de inflación de la varianza (VIF), con el propósito de validar la relación entre las proporciones de los componentes del concreto y sus resistencias mecánicas.

Los resultados evidenciaron una relación estadísticamente significativa entre las variables predictoras y las propiedades mecánicas del concreto autocompactante, permitiendo

desarrollar ecuaciones de predicción con la alta capacidad explicativa ($R^2=0.96$ para la resistencia a la compresión y $R^2=0.68$ para la resistencia a la flexión).

En conclusión, la investigación permitió desarrollar modelos predictivos robustos basados en la regresión lineal múltiple que relacionan la dosificación del concreto autocompactante con su resistencia a la compresión y a la flexión. Estos modelos no solo permiten un diseño de mezclas más eficientes y confiables, sino que también contribuyen a optimizar los procesos constructivos al reducir la dependencia de pruebas experimentales extensas y acelerar la evaluación de la resistencia a edades tempranas.

Palabras clave: Concreto Autocompactante (CAC), Capacidad de paso, Capacidad de llenado, Resistencia a la segregación, propiedades mecánicas.

Abstract

The main objective of this research is to develop a predictive model for the strength (compression and flexure) of self-compacting concrete based on its components (cement, water, aggregates, and admixture), using the statistical technique of multiple linear regression. This model seeks to optimize mix design, reducing the need for extensive laboratory experimental testing. The study adopts a quantitative, experimental, and applied approach, focusing on analyzing the mechanical behavior of self-compacting concrete as a function of its dosage.

Six experimental mix designs for self-compacting concrete were formulated, in which the proportions of the constituent materials were intentionally varied. The developed mixes fall within the slump ranges specified by ACI 237R-07. Self-compacting properties were verified using L-Box, V-Funnel, and Slump Flow tests. All experimental procedures were carried out in accordance with the guidelines established by EFNARC and ACI 237R-07, both for the design of mixtures and for the evaluation of concrete self-compactibility.

The data obtained from the compressive and flexural strength tests were processed and analyzed using Minitab software, applying multiple linear regression models. This analysis evaluated key statistical indicators, such as the coefficient of determination (R^2), p-values, and the variance factor (VIF), to validate the relationship between the proportions of concrete components and their mechanical strengths.

The results showed a statistically significant relationship between the predictor variables and the mechanical properties of self-consolidating concrete, allowing the development of predictive equations with high explanatory power ($R^2 = 0.96$ for compressive strength and $R^2 = 0.68$ for flexural strength).

In conclusion, the research allowed the development of robust predictive models based on multiple linear regression that relate the dosage of self-consolidating concrete to its

compressive and flexural strength. These models not only enable more efficient and reliable mix design, but also contribute to optimizing construction processes by reducing the dependence on extensive experimental testing and accelerating early-age strength assessment.

Keywords: Self-consolidating concrete (SCC), Passing capacity, Filling capacity, Segregation resistance, Mechanical properties.

Índice de Contenido

Resumen.....	i
Abstract	iii
Introducción	xvi
Capítulo I Planteamiento del Problema	17
Situación Problemática.....	17
Problemas de la Investigación.....	19
Problema General	19
Problemas Específicos.....	19
Objetivos de la Investigación	19
Objetivo General	19
Objetivos Específicos	19
Justificación de la Investigación	20
Limitaciones	21
Delimitaciones.....	22
Capítulo II Marco Teórico.....	23
Antecedentes de la Investigación	23
Antecedentes a Nivel Internacional.....	23
Antecedentes a Nivel Nacional	27
Antecedentes a Nivel Local.....	28
Bases Teóricas	29
Concreto Autocompactante	29
Materiales del Concreto Autocompactante	32
Propiedades del Concreto Autocompactante en Estado Fresco	36
Ensayos Preliminares del Concreto Autocompactante.....	37
Propiedades Mecánicas del Concreto Endurecido	50
Resistencia a la Compresión (F'_c)	50
Módulo de Elasticidad (E_c).....	52
Módulo de Rotura (f_r)	53
Diseño de Mezclas del Concreto Autocompactante	55
Generalidades sobre el Procedimiento para la Proporción de Mezcla	55
Método del ACI 237R-07	56
Método de Okamura, Ozawa, Maekawa y Ouchi	59
Método de la EFNARC	60
Conceptos Estadísticos.....	61
Modelo de Regresión Lineal Simple	61

Error Estándar	63
Error Estándar Residual	63
Intervalos de Confianza.....	64
Pruebas de Hipótesis	64
T-estadístico.....	65
Valor p	65
Coeficiente de Determinación R^2	65
VIF	66
Modelo de Regresión Lineal Múltiple	67
Capítulo III Metodología de la Investigación	69
Formulación de la Hipótesis.....	69
Hipótesis General	69
Hipótesis Específica	69
Tipo de Investigación	69
Alcance de la Investigación.....	70
Enfoque de la Investigación	70
Diseño de la Investigación	70
Tipo de Diseño Experimental.....	71
Número de Tratamientos (Mezclas)	71
Muestras y Réplicas	72
Condiciones Experimentales	72
Análisis de los Datos	73
Identificación de Variables e Indicadores.....	73
Variable Independiente	73
Variable Dependiente	74
Población de Estudio	74
Población.....	74
Muestra.....	74
Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	75
Técnicas.....	76
Instrumentos	76
Técnicas de Procesamiento y Análisis de Datos	77
Flujograma de Trabajo	77
Recolección de Datos	78
Exploración de Canteras.....	78
Ensayos para Determinar las Características de las Propiedades de los Agregados.....	80

Diseño de Mezclas del Concreto Autocompactante	98
Ensayos para Determinar las Propiedades de Autocompactabilidad del Concreto Autocompactante	112
Elaboración y Curado de Especímenes de Concreto Autocompactante en Laboratorio	126
Ensayos para Determinar las Propiedades Mecánicas del Concreto Autocompactante.....	134
Capítulo IV Resultados de la Investigación	140
Resultados de la Caracterización de los Agregados	140
Análisis Granulométrico	140
Contenido de Humedad	142
Cantidad de Material Fino que pasa el Tamiz N°200.....	143
Peso Específico y Absorción	145
Peso Unitario Suelto de los Agregados	146
Peso Unitario Compactado de los Agregados	147
Ensayo de Abrasión los Ángeles	148
Resultados del Diseño de Mezclas del Concreto Autocompactante	148
Máxima Compacidad del Esqueleto Granular	148
Proporciones Definidas del Diseño de Mezclas del Concreto Autocompactante	150
Resultados de los Ensayos de Autocompactabilidad del Concreto Autocompactante	150
Resultados de las Pruebas de Fluidéz del Mortero	150
Resultados de las Pruebas de Autocompactabilidad del Concreto	153
Resultados de los Ensayos de las Propiedades Mecánicas del Concreto Autocompactante	158
Peso Unitario Endurecido del Concreto Autocompactante	158
Resultados del Ensayo de Compresión del Concreto Autocompactante.....	161
Resultados del Módulo de Elasticidad del Concreto autocompactante.....	168
Resultados del Ensayo de Flexión del Concreto autocompactante	174
Capítulo V Análisis e Interpretación de los Resultados	180
Análisis de los Resultados de los Ensayos de Autocompactabilidad del Concreto	180
Análisis de los Resultados de Fluidéz del Mortero	180
Análisis de los Resultados de Autocompactabilidad de Pruebas al Concreto	180
Análisis de los Resultados de las Propiedades Mecánicas del Concreto Autocompactante	183
Análisis Estadístico de los Resultados de la Resistencia a la Compresión ..	183
Análisis Estadístico de los Resultados de la Resistencia a la Flexión	192

Análisis Estadístico de la Ecuación de Regresión Lineal Múltiple.....	200
Análisis de los Resultados de la Regresión Lineal Múltiple para Predecir la Resistencia a Compresión	200
Comparaciones de los Valores Previstos y los Valores Experimentales de la Resistencia a la Compresión.	208
Análisis de los Resultados de la Regresión Lineal Múltiple para Predecir la Resistencia a la Flexión.....	212
Comparaciones de los Valores Previstos y los Valores Experimentales de la Resistencia a la Flexión.....	218
Discusión de Resultados en el Contexto de Investigaciones Anteriores.....	221
Gráficas de Residuos de los Modelos de Regresión	222
Capítulo VI Conclusiones y Recomendaciones	226
Conclusiones	226
Recomendaciones.....	229
Bibliografía	230
Anexos	234

Índice de Tablas

Tabla 1	Requerimientos de granulometría para el agregado fino	34
Tabla 2	Métodos de prueba para evaluar las características del concreto autocompactante ..	37
Tabla 3	Criterios del VSI	43
Tabla 4	Valores del índice de estabilidad visual	43
Tabla 5	Rango de aplicaciones para el tipo de asentamiento del concreto autocompactante.	45
Tabla 6	Características de la mezcla en base al flujo de asentamiento T50	45
Tabla 7	Características de la mezcla en base al tiempo de descarga Tv	50
Tabla 8	Objetivos del flujo de asentamiento	56
Tabla 9	Rango de valores sugeridos del contenido de cemento	58
Tabla 10	Resumen de las proporciones de ensayo del concreto autocompactante.....	58
Tabla 11	Rangos típicos de los componentes de la mezcla de un concreto autocompactante	60
Tabla 12	Interpretación de los VIF	67
Tabla 13	Diseño factorial parcial o reducido con ajustes empíricos o criterios técnicos	72
Tabla 14	Número de muestra de especímenes (briquetas)	75
Tabla 15	Número de muestra de especímenes (viguetas).....	75
Tabla 16	Tamaño mínimo de las muestras para el ensayo de granulometría	80
Tabla 17	Masa mínima para muestra de campo del agregado fino	81
Tabla 18	Tamaño mínimo de la muestra del agregado grueso para el contenido de humedad	83
Tabla 19	Tamaño de la muestra mínima para el ensayo	84
Tabla 20	Cantidad mínima de muestra	85
Tabla 21	Masa mínima de ensayo del peso específico del agregado grueso.....	88
Tabla 22	Masa de agregado grueso y fino considerando 7kg de esqueleto granular.....	99
Tabla 23	Contenido de cemento requerido para determinados flujos de asentamiento.....	104
Tabla 24	Cantidad de aire aproximado en la mezcla.....	105
Tabla 25	Proporcionamiento de los parámetros de mezcla	105
Tabla 26	Requerimientos generales de volumen para la mezcla del concreto autocompactante	106
Tabla 27	Métodos de prueba para medir las características del concreto autocompactante.	117
Tabla 28	Índice de estabilidad visual (VSI) del concreto autocompactante.....	119
Tabla 29	Tolerancia para efectuar el ensayo de la resistencia a la compresión.....	136
Tabla 30	Análisis granulométrico del agregado grueso de Vicho	140
Tabla 31	Análisis granulométrico del agregado fino de Cunyac.....	141
Tabla 32	Resultados del porcentaje de humedad del agregado grueso de Vicho	143
Tabla 33	Contenido de humedad del agregado fino de Cunyac	143
Tabla 34	Cantidad de material fino que pasa el tamiz N°200 del agregado grueso de Cunyac	144
Tabla 35	Cantidad de material fino que pasa el tamiz N°200 del agregado fino de Cunyac	144
Tabla 36	Peso específico y absorción del agregado grueso de Vicho	145
Tabla 37	Peso específico y absorción del agregado fino	146
Tabla 38	Resultados del peso unitario Suelto del agregado grueso de Vicho	146
Tabla 39	Resultados del peso unitario Suelto del agregado fino de Cunyac.....	147
Tabla 40	Resultados del peso unitario compactado del agregado grueso de Vicho	147
Tabla 41	Resultados del peso unitario compactado del agregado fino de Cunyac.....	148
Tabla 42	Resultados del agregado grueso de Vicho en el ensayo de abrasión	148
Tabla 43	Máxima compacidad de arena de Cunyac y agregado grueso de Vicho.....	149
Tabla 44	Dosificación para la preparación de los especímenes de estudio	150
Tabla 45	Resultados de las pruebas de fluidez al mortero de la mezcla CAC-355	150

Tabla 46	Resultados de las pruebas de fluidez al mortero de la mezcla CAC-385	151
Tabla 47	Resultados de las pruebas de fluidez al mortero de la mezcla CAC-420	151
Tabla 48	Resultados de las pruebas de fluidez al mortero de la mezcla CAC-450	152
Tabla 49	Resultados de las pruebas de fluidez al mortero de la mezcla CAC-470	152
Tabla 50	Resultados de las pruebas de fluidez al mortero de la mezcla CAC-500	153
Tabla 51	Resultados de las pruebas de autocompactación al concreto de la mezcla CAC-355	153
Tabla 52	Resultados de las pruebas de autocompactación al concreto de la mezcla CAC-385	154
Tabla 53	Resultados de las pruebas de autocompactación al concreto de la mezcla CAC-420	155
Tabla 54	Resultados de las pruebas de autocompactación al concreto de la mezcla CAC-450	155
Tabla 55	Resultados de las pruebas de autocompactación al concreto de la mezcla CAC-470	156
Tabla 56	Resultados de las pruebas de autocompactación al concreto de la mezcla CAC-500	157
Tabla 57	Peso unitario endurecido del CAC-355	158
Tabla 58	Peso unitario endurecido del CAC-385	158
Tabla 59	Peso unitario endurecido del CAC-420	159
Tabla 60	Peso unitario endurecido del CAC -450 kg/m ³	160
Tabla 61	Peso unitario endurecido del CAC-470	160
Tabla 62	Peso unitario endurecido del CAC-500	161
Tabla 63	Resistencia a la compresión del CAC-355	162
Tabla 64	Resistencia a la compresión del CAC-385	163
Tabla 65	Resistencia a la compresión del CAC-420	164
Tabla 66	Resistencia a la compresión del CAC-450	165
Tabla 67	Resistencia a la compresión del CAC-470	166
Tabla 68	Resistencia a la compresión del CAC-500	167
Tabla 69	Módulo de elasticidad del CAC-355	168
Tabla 70	Módulo de elasticidad del CAC-385	169
Tabla 71	Módulo de elasticidad del CAC-420	170
Tabla 72	Módulo de elasticidad del CAC-450	171
Tabla 73	Módulo de elasticidad del CAC-470	172
Tabla 74	Módulo de elasticidad del CAC-500	173
Tabla 75	Módulo de rotura del CAC-355	174
Tabla 76	Módulo de rotura del CAC-385	175
Tabla 77	Módulo de rotura del CAC-420	176
Tabla 78	Módulo de rotura del CAC-450	177
Tabla 79	Módulo de rotura del CAC-470	178
Tabla 80	Módulo de rotura del CAC-500	179
Tabla 81	Análisis de resultados de la fluidez del mortero	180
Tabla 82	Resultados y caracterización de las mezclas por el flujo de asentamiento del concreto	181
Tabla 83	Resultados y caracterización de las mezclas por T50	181
Tabla 84	Resultados y caracterización de las mezclas por el tiempo de descarga	182
Tabla 85	Resultados de la prueba de la caja en “L”	182
Tabla 86	Prueba de relación r ₂₂ de Dixon de los valores obtenidos en los ensayos de compresión	183
Tabla 87	Resultados de la resistencia a la compresión de los especímenes	189

Tabla 88	Análisis de varianza.....	190
Tabla 89	Resultado del análisis de varianza de las muestras a compresión	190
Tabla 90	Intervalos de confianza de la resistencia a la compresión del concreto autocompactante.....	190
Tabla 91	Comparaciones método de Tukey y una confianza de 95% de la resistencia a la compresión	191
Tabla 92	Prueba de relación r_{22} de Dixon de los valores obtenidos en los ensayos de flexión	192
Tabla 93	Valores atípicos de la resistencia a la flexión	193
Tabla 94	Resultados de la prueba a flexión de los especímenes	197
Tabla 95	Análisis de varianza.....	198
Tabla 96	Resultado del análisis de varianza de las muestras a flexión	198
Tabla 97	Intervalos de confianza	198
Tabla 98	Información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%	199
Tabla 99	Resultados de las observaciones de la resistencia a la compresión en laboratorio del concreto autocompactante	201
Tabla 100	Comparación de valores experimentales y previstos de la resistencia a la compresión	208
Tabla 101	Resultados de las observaciones de la resistencia a la flexión en laboratorio del concreto autocompactante	213
Tabla 102	Comparación de valores experimentales y previstos de la resistencia a la flexión	218

Índice de Figuras

Figura 1	Dosificación del concreto autocompactante (SCC) y concreto normal.....	30
Figura 2	Cono de acero hueco para prueba de mini slump	39
Figura 3	Embudo en forma de “V” para prueba de V-Funnel del mortero	39
Figura 4	Prueba de flujo de asentamiento	42
Figura 5	Plano general de la caja en L	46
Figura 6	Dimensiones y diseño de la caja en L.....	47
Figura 7	Embudo "V".....	48
Figura 8	Briquetas de resistencia a la compresión	51
Figura 9	Diagrama de una máquina para ensayar la resistencia a la flexión	53
Figura 10	Ejemplo de ajuste de regresión lineal simple mediante el método de mínimos cuadrados.....	62
Figura 11	Ubicación de la cantera de Vicho.....	79
Figura 12	Ubicación de la cantera de Cunyac.....	79
Figura 13	Reducción de la muestra por cuarteo manual	81
Figura 14	Juego de tamices que se utilizaron en el agregado grueso y fino	82
Figura 15	Distribución de agregado grueso de Vicho y agregado fino de Cunyac.....	82
Figura 16	Peso de las muestras para el contenido de humedad del agregado grueso y fino..	84
Figura 17	Lavado del material fino que pasa la malla 200 del agregado grueso de Vicho....	86
Figura 18	Muestra de agregado grueso sumergida durante 24 horas	88
Figura 19	Preparación de la muestra de agregado fino ensayo de peso específico.....	89
Figura 20	Ensayo de peso específico del agregado grueso de Vicho.....	90
Figura 21	Masa del picnómetro hasta la marca de calibración e introducción del agregado.	91
Figura 22	Empleo de una máquina de vacíos para extraer el aire y medición de masa.....	91
Figura 23	Peso unitario suelto del agregado grueso y fino	94
Figura 24	Ensayo del peso unitario compactado del agregado grueso y agregado fino	96
Figura 25	Muestras pesadas según a la gradación B y preparación de la máquina de los ángeles	97
Figura 26	Ensayo de abrasión- equipo de abrasión los Angeles	98
Figura 27	Muestras de agregado grueso y fino para realizar el ensayo y su combinación ..	100
Figura 28	Enrase con varilla del margen superior del recipiente y determinación del peso de la muestra	100
Figura 29	Tipo de asentamiento de la mezcla de CAC en base a los requerimientos estructurales.....	103
Figura 30	Cono de acero para el ensayo de mini slump	113
Figura 31	Ensayo de mini slump flow del mortero.....	114
Figura 32	Desprendimiento del material sobrante y medición de diámetros del mortero ..	114
Figura 33	Dimensiones del embudo pequeño	115
Figura 34	Llenado del Embudo en “V” para el mortero y abertura de la compuerta metálica	116
Figura 35	Superficie horizontal para el ensayo de slump flow con dimensiones en mm	118
Figura 36	Nivelación horizontal de la superficie horizontal y llenado del cono de Abrahms con mezcla.....	120
Figura 37	Medición del flujo de asentamiento del concreto autocompactante.....	120
Figura 38	Embudo en “V” para el ensayo de V-Funnel del concreto con dimensiones en mm	122
Figura 39	Nivelación de la superficie horizontal para el inicio del ensayo V-Funnel	123
Figura 40	Enrasado de la mezcla en el embudo	123
Figura 41	Caja en “L” con todas las dimensiones en mm.....	125

Figura 42	Llenado la caja en “L” en un solo acto y enrasamiento de la superficie	126
Figura 43	Apertura de la compuerta y obtención de H1 y H2 del ensayo de caja en “L” ...	126
Figura 44	Tamizado del agregado grueso usando la malla de $\frac{3}{4}$ y su posterior lavado	128
Figura 45	Secado del agregado grueso y almacenamiento para conservar su humedad.....	128
Figura 46	Secado al aire libre, tamizado y almacenamiento del agregado fino.....	129
Figura 47	Secuencia de mezclado del concreto autocompactante	130
Figura 48	Slump Flow de los vaciados de la mezcla CAC-355 y CAC-385	130
Figura 49	Slump Flow de los vaciados de la mezcla CAC-420 y CAC-450	131
Figura 50	Slump Flow de los vaciados de la mezcla CAC-470 y CAC-500	131
Figura 51	Elaboración y vaciado de briquetas de concreto autocompactante durante la investigación.....	133
Figura 52	Elaboración y vaciado de viguetas de concreto autocompactante durante la investigación.....	134
Figura 53	Medición de las dimensiones y peso de los especímenes de concreto autocompactante.....	135
Figura 54	Briquetas de concreto autocompactante para evaluar su resistencia a la compresión	137
Figura 55	Colocación de la vigueta sobre los apoyos móviles y rotura en el tercio central	139
Figura 56	Análisis granulométrico del agregado grueso de Vicho	141
Figura 57	Curva granulométrica del agregado fino de Cunyac	142

Índice de Gráficas

Gráfica 1	Resistencia a la compresión obtenida a los 28 días del CAC-355	162
Gráfica 2	Resistencia a la compresión obtenida a los 28 días del CAC-385	163
Gráfica 3	Resistencia a la compresión obtenida a los 28 días del CAC-420	164
Gráfica 4	Resistencia a la compresión obtenida a los 28 días del CAC-450	165
Gráfica 5	Resistencia a la compresión obtenida a los 28 días del CAC-470	166
Gráfica 6	Resistencia a la compresión obtenida a los 28 días del CAC-500	167
Gráfica 7	Módulo de elasticidad obtenida a los 28 días del CAC-355	168
Gráfica 8	Módulo de elasticidad obtenida a los 28 días del CAC-385	169
Gráfica 9	Módulo de elasticidad obtenida a los 28 días del CAC-420	170
Gráfica 10	Módulo de elasticidad obtenida a los 28 días del CAC-450	171
Gráfica 11	Módulo de elasticidad obtenida a los 28 días del CAC-470	172
Gráfica 12	Módulo de elasticidad obtenida a los 28 días del CAC-500	173
Gráfica 13	Módulo de rotura obtenida a los 28 días del CAC-355.....	174
Gráfica 14	Módulo de rotura obtenida a los 28 días del CAC-385.....	175
Gráfica 15	Módulo de rotura obtenida a los 28 días del CAC-420.....	176
Gráfica 16	Módulo de rotura obtenida a los 28 días del CAC-450.....	177
Gráfica 17	Módulo de rotura obtenida a los 28 días del CAC-470.....	178
Gráfica 18	Módulo de rotura obtenida a los 28 días del CAC-500.....	179
Gráfica 19	Valores atípicos en los resultados de la resistencia a la compresión.....	183
Gráfica 20	Resumen estadístico de los resultados de la resistencia a la compresión del CAC-355	184
Gráfica 21	Resumen estadístico de los resultados de la resistencia a la compresión del CAC-385	185
Gráfica 22	Resumen estadístico de los resultados de la resistencia a la compresión del CAC-420	185
Gráfica 23	Resumen estadístico de los resultados de la resistencia a la compresión del CAC-450	186
Gráfica 24	Resumen estadístico de los resultados de la resistencia a la compresión del CAC-470	186
Gráfica 25	Resumen estadístico de los resultados de la resistencia a la compresión del CAC-500	187
Gráfica 26	Intervalos de confianza de la resistencia a la compresión.....	191
Gráfica 27	Valores atípicos en los resultados de la resistencia a la flexión	192
Gráfica 28	Resumen estadístico de los resultados de la resistencia a la flexión del CAC-355	193
Gráfica 29	Resumen estadístico de los resultados de la resistencia a la flexión del CAC-385	194
Gráfica 30	Resumen Estadístico de los resultados de la resistencia a la flexión del CAC-420	194
Gráfica 31	Resumen estadístico de los resultados de la resistencia a la flexión del CAC-450	195
Gráfica 32	Resumen estadístico de los resultados de la resistencia a la flexión del CAC-470	195
Gráfica 33	Resumen estadístico de los resultados de la resistencia a la flexión del CAC-500	196
Gráfica 34	Intervalos de confianza	199
Gráfica 35	Valores previstos y experimentales de la resistencia a la compresión	212

Gráfica 36	Valores previstos y experimentales de la resistencia a la flexión.....	220
Gráfica 37	Graficas de residuos de la resistencia a la compresión	223
Gráfica 38	Gráficas de residuos de la resistencia a la flexión (módulo de rotura)	224

Introducción

El concreto sigue siendo uno de los materiales más utilizados en la construcción en el mundo, y el concreto autocompactante es un material de construcción avanzado que se utiliza particularmente cuando se tiene escenarios complejos de encofrados y alta densidad de armadura que limiten el uso tradicional de los métodos de vibrado.

A pesar de sus diversas ventajas, el diseño de mezclas del concreto autocompactante sigue siendo un desafío técnico, esto debido a la compleja interacción entre sus componentes: cemento, agua, agregados, aditivos superplastificantes y otras posibles incorporaciones. Esta complejidad genera la necesidad de métodos predictivos que permitan anticipar el comportamiento mecánico del concreto a partir de sus proporciones de la mezcla.

En este escenario la estadística aplicada específicamente la regresión lineal múltiple se utiliza como una herramienta adecuada para modelar la relación entre las proporciones de los componentes del concreto autocompactantes y sus propiedades mecánicas, particularmente la resistencia a la compresión y tracción.

El presente estudio tiene como objetivo desarrollar el modelo de regresión lineal múltiple capaz de predecir dichas resistencias, utilizando datos experimentales obtenidos en el laboratorio de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, A partir de seis mezclas diseñadas bajo criterios de autocompactabilidad establecidos por la ACI 237R-07 y la EFNARC.

Esta investigación busca aportar al conocimiento técnico del concreto autocompactante, ofreciendo una herramienta de análisis que puede ser útil en futuras investigaciones y en la optimización de diseños de mezclas, dentro de las limitaciones de validez del modelo.

Capítulo I

Planteamiento del Problema

Situación Problemática

A lo largo del tiempo, el concreto ha sido el material predominante en la industria de la construcción gracias a su versatilidad, durabilidad y facilidad del moldeo. No obstante, la creciente complejidad de las estructuras modernas ha impulsado la necesidad de desarrollar concretos con propiedades avanzadas, como el concreto autocompactante, el cual puede fluir y consolidarse sin asistencia mecánica, permitiendo su colocación incluso en estructuras densamente reforzadas o de geometría compleja (Okamura & Ouchi, 2003).

El concreto autocompactante se ha consolidado como una solución eficaz en contextos donde los concretos tradicionales presentan limitaciones, como encofrados irregulares, secciones delgadas o zonas congestionadas con acero de refuerzo. A pesar de sus ventajas, su uso generalizado aun enfrenta diversas barreras. Uno de los principales desafíos es la confiabilidad de su resistencia mecánica, especialmente en mezclas diseñadas para grandes volúmenes o estructuras de alta exigencia. Las variaciones en la dosificación, la falta de control preciso de las proporciones y la calidad de los componentes pueden comprometer la resistencia a largo plazo y la durabilidad del material (Ouchi et al., 2004).

Por otro lado, la utilización de aditivos especiales, necesarios para lograr la autocompactabilidad, eleva los costos de producción. En entornos con presupuestos limitados, esta característica puede hacer que el concreto autocompactante resulte menos competitivo frente al concreto convencional. Melo et al. (2009) señalan que el uso de aditivos de alta calidad y el estricto control de la mezcla son factores determinantes para su efectividad, aunque estos mismos factores también representan una barrera económica. En esta línea, Shin et al. (2016) destacan la necesidad de implementar tecnologías inteligentes que permitan monitorear la

consistencia y calidad del concreto durante su colocación, especialmente en obras de difícil acceso.

Además, la calidad del concreto autocompactante puede verse afectada por factores externos como de obra no especializada o la falta de equipos adecuados, lo cual podría generar defectos en los elementos estructurales y, en consecuencia, aumentar los costos por reparaciones (Gonzales et al., 2005). La ausencia de normativas específicas para el uso del concreto autocompactante en muchos países, incluyendo el Perú, agrava aún más la problemática. Según Kwan et al. (2010), la falta de guías técnicas claras puede generar incertidumbre respecto a su aplicación, especialmente en proyectos de gran escala que requieren criterios de diseño y control más rigurosos.

En el caso específico del Perú, el uso del concreto autocompactante aún no está suficientemente difundido en todos los sectores constructivos, particularmente en edificaciones de gran altura o condominios. Esto se debe en parte a que la Norma Técnica Peruana no proporciona lineamientos suficientes para la caracterización del concreto autocompactante en estado fresco, ni para el diseño adecuado de sus mezclas (Sánchez, 2014).

En este contexto, uno de los principales desafíos radica en predecir de forma precisa las propiedades de resistencia del concreto autocompactante, las cuales son esenciales para garantizar la seguridad y durabilidad estructural. Dado que estas propiedades dependen de múltiples variables de las mezclas, su determinación mediante ensayos físicos resulta costosa y demanda tiempo, lo cual puede limitar la implementación práctica del concreto autocompactante en proyectos con requerimientos estructurales complejos. Ante esta problemática, se hace indispensable el desarrollo de modelos estadísticos predictivos, como la regresión lineal múltiple, que permite estimar el comportamiento mecánico del concreto a partir de las proporciones de sus componentes. Este enfoque permitirá optimizar el diseño de mezclas

sin depender exclusivamente de métodos empíricos, mejorando la precisión en la predicción de resultados, reduciendo el margen de error y fortaleciendo el control de calidad en obras civiles.

Problemas de la Investigación

Problema General

PG: ¿Cuál será el modelo de regresión lineal múltiple para predecir las propiedades mecánicas del concreto autocompactante a partir de la dosificación de sus componentes?

Problemas Específicos

PE1: ¿Cuál será el modelo de regresión lineal múltiple para predecir la resistencia a la compresión del concreto autocompactante a partir de la dosificación de sus componentes?

PE2: ¿Cuál será el modelo de regresión lineal múltiple para predecir la resistencia a la flexión del concreto autocompactante a partir de la dosificación de sus componentes?

PE3: ¿Qué variables de la mezcla tiene mayor peso predictivo en la resistencia del concreto autocompactante, según el modelo de regresión lineal múltiple?

PE4: ¿Cuál será la precisión del modelo de regresión propuesto para estimar la resistencia del concreto autocompactante con base en los materiales utilizados?

Objetivos de la Investigación

Objetivo General

OG: Desarrollar un modelo de regresión lineal múltiple que permita predecir las propiedades mecánicas del concreto autocompactante en función de las proporciones de sus componentes.

Objetivos Específicos

OE1: Desarrollar un modelo de regresión lineal múltiple que permita predecir la resistencia a la compresión del concreto autocompactante en función de las proporciones de sus componentes.

OE2: Desarrollar un modelo de regresión lineal múltiple que permita predecir la resistencia a la flexión del concreto autocompactante en función de las proporciones de sus componentes.

OE3: Establecer que componentes de la mezcla tiene mayor influencia en la resistencia, según el modelo de regresión lineal múltiple.

OE4: Validar la precisión del modelo de regresión lineal múltiple para predecir la resistencia del concreto autocompactante

Justificación de la Investigación

El concreto autocompactante en las últimas décadas ha ganado popularidad en las últimas décadas debido a su capacidad de fluir y compactarse sin la necesidad de vibración mecánica externa. Esta característica lo convierte en una solución ideal para estructuras con geometrías complejas, encofrados de difícil acceso y elementos con alta densidad de refuerzo, situaciones donde los concretos convencionales suelen presentar limitaciones significativas (Okamura & Ouchi, 2003). Además, el concreto autocompactante contribuye a una mejora notable en la calidad del concreto endurecido, reduciendo la aparición de defectos como la segregación, cangrejeras y vacíos de consolidación (Domone, 2006).

No obstante, a pesar de sus múltiples beneficios en el ámbito constructivo, el diseño de mezcla de concreto autocompactante continúa siendo un proceso predominante empírico, que depende de una serie de pruebas experimentales reiterativas. Esta práctica resulta demandante tanto en tiempo como en recursos económicos y materiales. Uno de los principales retos se encuentra en la complejidad de las interacciones entre los diferentes componentes de la mezcla

(cemento, agua, agregado fino, agregado grueso y aditivos superplastificantes) cuya proporción debe ser cuidadosamente equilibrada para garantizar tanto la trabajabilidad en estado fresco como las propiedades mecánicas en estado endurecido (Safiuddin et al., 2011).

En este contexto, surge la necesidad de contar las herramientas analíticas que permitan predecir el comportamiento del concreto autocompactante en función de sus proporciones constitutivas. En particular, la regresión lineal múltiple se presenta como una metodología estadística y robusta para establecer relaciones cuantitativas entre variables continuas, permitiendo modelar la resistencia del concreto a partir de los parámetros de dosificación (Montgomery, Peck & Vining, 2012). Su implementación en el diseño de mezclas puede reducir significativamente la cantidad de ensayos experimentales requeridos, facilitar el control de calidad, y acelerar los procesos de optimización en obra.

La presente investigación plantea un modelo predictivo basado en datos experimentales obtenidos en laboratorio, con el propósito de contribuir al desarrollo académico y técnico del diseño de mezclas para concreto autocompactante. Asimismo, este trabajo busca ofrecer una herramienta practica para ingenieros y profesionales del sector de la construcción, promoviendo un diseño más eficiente, el uso racional de materiales y la mejora de procesos constructivos complejos, tales como edificaciones verticales, elementos prefabricados, túneles y estructuras de infraestructura pesada (Khayat, 1999).

Limitaciones

- El estudio se desarrolló en condiciones de laboratorio en la UNSAAC, con control limitado de variables ambientales.
- El estudio se basó en el análisis de seis mezclas experimentales de concreto autocompactante lo que podría limitar generalizar los resultados.

- El modelo desarrollado de regresión es específico para concretos autocompactantes con las características utilizadas en este estudio y no podrá ser extrapolada directamente a otros tipos de concreto sin la correspondiente validación.
- El modelo estadístico asume relaciones lineales entre variables, homocedasticidad y normalidad de los residuos.
- El estudio se enfocó únicamente en la resistencia a la compresión y flexión.

Delimitaciones

- La investigación se centra exclusivamente en el estudio del concreto autocompactante, diseñado con una dosificación experimental específica que incluye cemento portland tipo IP, agregados (grueso y fino), agua y un aditivo superplastificante.
- Solo se analizarán propiedades mecánicas del concreto autocompactante específicamente las relacionadas a la resistencia a la compresión y la resistencia a la flexión ambas determinadas a los 28 días de curado.
- Las variables predictoras utilizadas para el modelo de regresión son los componentes del concreto: cemento, agua, agregados y aditivo.
- La única técnica estadística aplicada será la regresión lineal múltiple con el objetivo de generar un modelo predictivo basado en las proporciones de sus componentes.
- El estudio se realizó en laboratorio. No se considera la validación en campo ni en condición de obra real.
- Se trabajo con seis mezclas diferentes de concreto autocompactante, diseñadas experimentalmente que permite representar variaciones controladas en sus proporciones, lo cual nos permite la aplicación del modelo.

Capítulo II

Marco Teórico

Antecedentes de la Investigación

Antecedentes a Nivel Internacional

Gadve & Jajodia (2022), realizaron el artículo de investigación titulado “Desarrollo de modelos estadísticos para la predicción de propiedades mecánicas del hormigón simple” para la revista: Informes de la Construcción, en el presente artículo de investigación se desarrolló el empleo de modelos estadísticos de regresión lineal múltiple empleando el software estadístico IBM-SPSS Statistics (versión 23) y considerando 4 variables predictoras: la cantidad de agregado grueso, agregado fino, agua y cemento para poder pronosticar la resistencia a la compresión, el módulo de rotura y el módulo de elasticidad. Para el modelo emplearon 8 tipos de mezclas y en cada uno se hizo 4 muestras por cada diseño de mezclas para encontrar la resistencia a la compresión y 3 muestras por cada diseño de mezclas para el módulo de rotura y módulo de elasticidad del concreto simple. Concluyen que los valores predichos obtenidos a partir de los modelos propuestos se acercan muy bien a los valores experimentales. En esta investigación los modelos de regresión desarrollados obtuvieron un coeficiente de determinación R^2 de 97% y de 94% para estimar la resistencia a compresión y flexión respectivamente y las desviaciones porcentuales de los datos predichos con los valores reales fueron menores a 10% en ambos modelos lo que refuerza la capacidad predictiva de dichos modelos. Este antecedente sirvió de base para establecer las variables predictoras del modelo de regresión, más específicamente en el análisis estadístico y la interpretación de resultados.

Khayat. K.H. (1999), en su estudio exploró ampliamente las diferentes propiedades de trabajabilidad, pruebas y rendimiento del concreto autocompactante, destacando que el concreto autocompactante debe poseer una fluidez adecuada de manera que se asegure que la

distribución sea uniforme, también examino diferentes métodos para medir la trabajabilidad, ensayos de flujo, pruebas de caja en “V-Funnel” y observar como el concreto fluye a través de espacios estrechos y mantener una buena cohesión, concluyendo que el concreto autocompactante es una opción más eficiente que el concreto convencional ya que elimina la necesidad de vibración reduciendo los defectos como los vacíos o las burbujas de aire. Añade también que un diseño de mezcla adecuado es el factor que define el éxito del concreto autocompactante de modo que se debe considerar la cantidad correcta de agregados, superplastificante y agua. Este antecedente sirve de base para para realizar la ejecución de los ensayos de laboratorio, particularmente con la evaluación de las propiedades de autocompactabilidad del concreto.

Carrasco (2020) realizó la tesis de maestría: “Modelos predictivos aplicados a la resistencia a compresión del hormigón de un proyecto hidroeléctrico en Ecuador” en la Universidad Politécnica de Valencia donde presentó información de los materiales y del concreto normal y autocompactante en un laboratorio de control de calidad de una central hidroeléctrica construida en la selva del Ecuador para posteriormente determinar mediante modelos de regresión múltiple la incidencia de las variables en la resistencia a la compresión, así como evaluar la capacidad de predicción de las redes neuronales artificiales y luego comparar ambos modelos. En el estudio estadístico clásico empleó los softwares Minitab® 19.2020.1 y el IBM SPSS Statistics 25 donde empleó datos de los 709 ensayos de caracterización disponibles, siendo 564 de estos datos de concreto convencional y 145 de concreto autocompactante. El autor planteó como variables predictoras la relación agua/cemento, el contenido de agua, cemento, la temperatura, el slump en el cono de Abrahms, el tiempo de curado, la humedad evaluada para cada mes y otras. Determinó que la correlación que mejor explica la resistencia a la compresión del concreto es el contenido de agua, siendo que a mayor contenido de agua la resistencia disminuye, también determinó que otra variable

muy importante es el contenido de cemento, mientras más cemento tenga una mezcla alcanzará mayores resistencias. No encontró relación estadística entre la resistencia a la compresión y la temperatura después de la fabricación de los especímenes ni del asentamiento del cono de Abrams. Al elaborar sus modelos de regresión múltiple con las diferentes variables solo consiguió valores de coeficiente de determinación entre 21.90% y 38.7% a los 28 días de curado mientras que los modelos elaborados con redes neuronales artificiales obtuvieron un coeficiente de determinación de 80.2% y 53.1% con los softwares Matlab y SPSS respectivamente con lo que concluyó que el método de redes neuronales es una mejor herramienta con respecto a la regresión lineal múltiple.

Gatia Caiza et al. (2025), realizaron el artículo de investigación titulado: “Predicción de la resistencia a compresión del hormigón simple usando un modelo de regresión lineal múltiple” para la revista: Alfa Publicaciones, en este artículo de investigación plantearon el diseño de un modelo de regresión lineal múltiple para estimar el valor de la resistencia a la compresión del concreto simple a los 7, 14 y 28 días de curado empleando el 80% de datos es decir 144 para elaborar el modelo estadístico y el 20% de datos es decir 35 para corroborar dicho modelo, también evaluaron veintiocho variables predictoras inicialmente como el asentamiento, densidad del cemento, las propiedades físico-mecánicas de los agregados, la edad del concreto y las cantidades de agua, cemento, grava y arena mediante el método de un paso adelante y uno atrás que es agregar y eliminar variables predictoras de forma sucesiva hasta obtener un modelo que se ajuste a los datos excluyendo variables que no interfieran con la capacidad predictiva del modelo de regresión. Validaron la capacidad predictiva del modelo con los parámetros R^2 (coeficiente de determinación), RMSE (Raíz del error cuadrático medio) y el MAPE (Error porcentual absoluto medio). Los especímenes elaborados fueron previamente diseñados para una resistencia de 240 kg/cm² a los 28 días de curado. Obtuvieron los resultados de que la edad del concreto es la variable que presenta mayor correlación lineal (0.648) y que trece variables

fueron estadísticamente representativas para elaborar un modelo de 90% de confianza. Concluyeron que tuvieron un su modelo estadístico de regresión lineal múltiple es aceptable ya que genera estimaciones tolerables ya que obtuvieron una desviación porcentual absoluto medio de 7% y un valor del coeficiente de determinación de 79.45%. Este antecedente sirve de base para realizar el análisis estadístico del modelo de regresión lineal múltiple, evitar los problemas de multicolinealidad e interpretar los valores de significancia de las variables predictoras.

Silva et al. (2018) realizaron el artículo de investigación titulado: “Valorización y optimización del residuo de mampostería para la elaboración de concreto autocompactante” en la que emplearon residuo de mampostería como material complementario al cemento para la elaboración de concretos autocompactantes. Reemplazaron en volumen de 0 a 50% la cantidad de cemento por residuo de mampostería. Determinaron las propiedades de autocompactabilidad del concreto autocompactante con los ensayos de flujo de asentamiento, la caja en “L” y el embudo en “V”, con respecto a la resistencia a la compresión para estimar la cantidad óptima de reemplazo de residuo de mampostería por cemento emplearon un modelo de regresión lineal múltiple con un término de interacción de la siguiente forma: $Y = \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_1 X_2$ donde las variables predictoras son la cantidad de cemento y de residuo de mampostería y la variable de respuesta es la resistencia a la compresión del concreto autocompactante. Si bien las mezclas que propusieron cumplieron de manera general las propiedades de autocompactación tomando como guía a la EFNARC mientras más reemplazaban el cemento por residuo de mampostería menor se hacía la resistencia a la compresión. Con respecto al modelo de regresión plantearon un nivel de significancia de 0.10 y establecieron las siguientes condiciones: valor mínimo: 28MPa y valor objetivo: 38MPa con lo que su modelo de regresión que obtuvieron tuvo un coeficiente de determinación de 95.54% con lo que concluyeron que su modelo de regresión es una buena herramienta de estimación para optimizar la cantidad de reemplazo de residuo de mampostería por cemento y que para valores de residuo de

mampostería menores a 25% se obtiene concretos autocompactantes con resistencias mayores a 37MPa.

González et al. (2005) realizaron la tesis de pregrado titulado: “Concreto autocompactable: propuesta para el diseño de mezcla. beneficios técnicos y consideraciones básicas para su implementación en El Salvador” en la Universidad de El Salvador, en dicha tesis se enfocaron en la manera de fomentar el uso del concreto autocompactante ya que existían problemas en las edificaciones del vaciado de concreto y los estudios insuficientes acerca de esta tecnología. Ellos proponen un diseño y ajuste de mezclas para el uso de este tipo de concreto en base a bibliografía existente. Estudiaron los materiales del concreto autocompactante y dieron dos diseños de mezcla a evaluarse y ajustarse. Concluyeron que la cantidad de partículas que pasan la malla N° 100 son significativos para proveer a las mezclas de sus cualidades autocompactantes, que el empleo de un aditivo superplastificante es indispensable en este tipo de concreto ya que requiere de fluidez y cohesión, los diseños de mezclas de concreto autocompactante se dan en base a volúmenes y no peso de los materiales y que para un diseño se debe plantear el agregado grueso y fino constituyentes del esqueleto granular, el cemento y el agua constituyentes de la pasta y a este último el aditivo constituyentes del mortero, tras esto se debe ajustar dichas proporciones ya que estos materiales varían de acuerdo al lugar donde se realice un concreto autocompactante. Este antecedente se utilizó como base para el diseño de mezclas del concreto autocompactante ya que esta tesis emplea el ensayo de máxima compacidad del esqueleto granular para calcular el porcentaje mínimo de vacíos la que será ocupada por la pasta en el concreto autocompactante.

Antecedentes a Nivel Nacional

Según Sánchez (2014), en este estudio de investigación titulado “Efecto del Aditivo Superplastificante Sika Viscocrete en la Resistencia Mecánica del Concreto Autocompactante”,

se analizó el comportamiento mecánico del concreto autocompactante en función a la variación del porcentaje de aditivo utilizado, ya que este componente influye en su microestructura y por lo tanto sus propiedades de resistente. Los resultados obtenidos en esta investigación manifiestan que cuando el porcentaje de superplastificante oscilaba entre 1% a 1.5% la resistencia a la compresión incrementa, mientras que si el porcentaje de aditivo superaba el 2% del contenido de cemento la resistencia a la compresión disminuye. Este antecedente sirve de base para realizar el diseño de mezclas en la etapa de laboratorio específicamente en la dosificación del aditivo superplastificante.

Antecedentes a Nivel Local

Según Baca & Vela (2019), realizaron la tesis de pregrado “Evaluación De Las Propiedades Mecánicas De Un Concreto Autocompactante Adicionando Fibras Sintéticas Sikacem ®-1 Fiber – Cusco 2019” en la Universidad Andina del Cusco, en dicha investigación los autores estudiaron la influencia de las fibras sintéticas como reforzamiento en el concreto autocompactante, evaluando las diferentes propiedades mecánicas como la fuerza a la compresión, el módulo de elasticidad y la resistencia a la flexión, formulando la hipótesis de que al emplear dichas fibras sus propiedades mecánicas aumentarían. Emplearon un diseño cuasi-experimental, un enfoque cuantitativo y nivel descriptivo. El diseño de mezclas para el concreto autocompactante fue realizado en base a la metodología ACI 237R-07 considerando principalmente la capacidad de paso, capacidad de relleno y la resistencia a la segregación; cualidades que dictaminan la calidad de auto compactación. cumpliendo las Directrices para el Hormigón Autocompactante 2006 y la metodología ACI 237R-07, para dicha investigación emplearon el aditivo reductor de agua con base policarboxilato Eurocoplast 8500 HP. Su muestra consistió en un total de 90 muestras, 45 briquetas y 45 vigas analizando el concreto autocompactante patrón y concreto autocompactante con 100gr. y 200gr. de fibra por bolsa de cemento, analizando la resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad y la resistencia a

la flexión. Concluyeron que al momento que midieron las propiedades con fibra del concreto autocompactante: que, si bien no se logró aumentar drásticamente dichas propiedades, existió una mejora. Existió una mejora en la resistencia a la compresión del concreto autocompactante, aumentando de 271.3kg/cm^2 a 289.3kg/cm^2 y 302.2kg/cm^2 con 100 y 200gr. de fibra sintética adicionada respectivamente. Este antecedente se utilizó para la elaboración de las fichas de recolección de datos en la etapa de ensayos de laboratorio.

Bases Teóricas

Concreto Autocompactante

El Concreto Autocompactante (CAC) es un tipo de concreto cuya característica principal es su alta trabajabilidad, siendo altamente fluido y viscoso debido al aditivo que provee esta característica particular. Esta mezcla de concreto logra acaparar y fluir a través del encofrado haciendo que no sea necesario el empleo de métodos de compactación y vibrado usados generalmente en obra tras el vaciado, reduciendo por ende el número del personal de las obras.

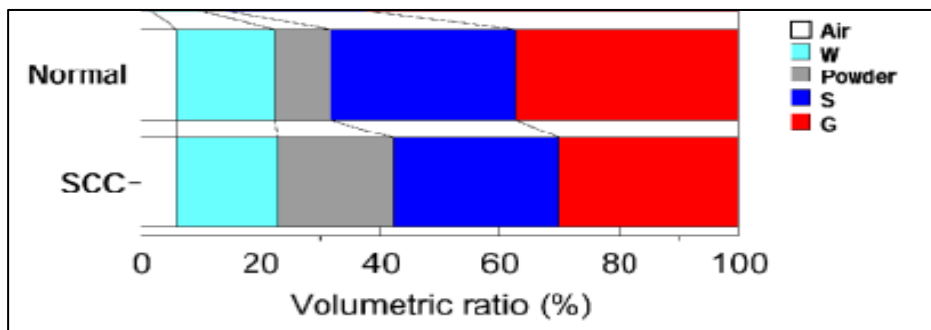
Un Concreto Autocompactante añade a las propiedades típicas de un concreto de uso habitual las propiedades de autocompatibilidad que es la cualidad de una compactación plena sin necesidad de proporcionar energía externa, vaciando la totalidad de encofrados y fluyendo en las armaduras cargadas de acero (Burón et al., 2006)

La forma de lograr la autocompactabilidad va más allá de tener una pasta con alta deformabilidad, influye también la resistencia a la segregación entre el agregado grueso y el mortero en el momento en que la mezcla fluye por el encofrado poblado de barras de refuerzo estructural, según Okamura & Masahiro (2003) para cumplirse esta característica índice del CAC se debe tener:

- Un contenido de agregado grueso de no más de 50% del volumen de la mezcla ya que de esta forma se reduce la frecuencia de colisión entre partículas y por ende se tendrá más energía para poder fluir.
- Una baja relación de agua/cemento lo que implica concretos de alta resistencia ya que existirá mayor cemento en la mezcla.
- El empleo de un aditivo superplastificante

Figura 1

Dosificación del concreto autocompactante (SCC) y concreto normal



Nota. Fuente: (Okamura & Masahiro, 2003)

Evolución e Historia. El Concreto Autocompactante es relativamente nuevo, desde el comienzo de los años 80 en Japón se tuvo como enfoque la durabilidad de las edificaciones, una parte importante del proceso de construcción como bien se conoce es el de la compactación de los elementos estructurales vaciados con la pasta de concreto. Sin embargo, en estos años en Japón se sufrió pérdidas del personal de trabajadores en las obras y por ende las estructuras perdieron calidad. Ante esto Hajime Okamura planteó en 1986 el desarrollo de la tecnología del concreto autocompactante, ya que este puede compactarse en todo el encofrado debido a su propio peso y reduciendo de esta forma el número de trabajadores que normalmente se tendría que necesitar en un vaciado con concreto típico (Okamura & Masahiro, 2003).

En la Universidad de Tokyo Maekawa y Ozawa realizaron investigaciones acerca de la tecnología del CAC y de su trabajabilidad, presentando en 1988 el primer modelo de CAC

denominándolo como “Concreto de Alto Desempeño” cumpliendo las propiedades necesarias del concreto típico y en estado fresco tuvo la característica de ser autocompactante, posteriormente se cambiaria la denominación a “Concreto Autocompactante de Alto Rendimiento” (Okamura & Masahiro, 2003).

En el 2002, la Federación Europea de Productos Químicos Especializados para la Construcción y Sistemas de Concreto (EFNARC) anunció su publicación titulada “Especificación y directrices para el hormigón autocompactante” brindando información de última generación y en 2004 cinco organizaciones europeas: BIBM, CEMBUREAU, ERMCO, EFCA y EFNARC, enfocadas al estudio de materiales de construcción y al estudio del concreto fundaron un “Grupo de Proyecto Europeo” para realizar las “Directrices Europeas para el Concreto Autocompactante”, documento que sirvió como guía pre-normativa del CAC definiendo los requisitos técnicos de los materiales y las mezclas (EFNARC et al., 2005).

En el año 2008 la revista *Techne* publicó sus estudios acerca del CAC en varios contextos evaluados por el costo, reducción de tiempo, calidad del concreto y mejor acabado. En nuestros días cada año se investiga teniéndose diferentes trabajos en congresos, seminarios, tesis de pregrado y postgrado, artículos de investigación acerca del CAC (Correia & Rodrigues, 2009).

Características.

- La mezcla de CAC es viscosa y homogénea.
- Goza de las mismas propiedades de durabilidad del concreto de vibrado típico
- Resistencia uniforme en todo el concreto.
- Posee relaciones de agua/cemento bajas lo que implica elevada resistencia a la compresión y flexión.

Aplicaciones.

- Elementos estructurales de alta densidad de refuerzo.
- Elementos estructurales de formas complicadas.
- Elementos estructurales de difícil acceso.
- Edificaciones que cuenten con poco personal.

Ventajas.

- Mayor productividad.
- Tiempos de construcción más rápidos.
- Rápida tasa de colocación del concreto.
- Provee potencial para un buen acabado a la estructura.
- Al no existir los equipos vibratorios se elimina la exposición del personal a los ruidos y vibraciones de estos.
- Mejora el rendimiento en la construcción.

Desventajas.

- Implementación de aditivos y por ende mayor costo del concreto.
- Se requiere conocedores en el empleo del CAC.
- Mayores pruebas preliminares para determinar si las mezclas cumplen con las propiedades del CAC.

Materiales del Concreto Autocompactante

En cualquier estudio acerca del concreto el primer paso es la elección de los diferentes materiales a utilizar dependiendo principalmente de la zona en que se realizara dicho estudio, el CAC tiene los mismos materiales que un concreto típico variando alguna característica de estos y el empleo de aditivos plastificantes, superplastificantes, incorporadores de aire y modificadores de la viscosidad generalmente.

Cemento. El cemento Portland en nuestros días un material mundialmente usado, es indispensable en el ámbito de la construcción, al mezclarse con agua y agregados se convierte químicamente en una pasta endurecida que posee varias propiedades características como la resistencia a la compresión, trabajabilidad, durabilidad, etc. Adquiriendo mayor resistencia a los 28 días. Cuando el cemento entra en contacto con el agua se produce una reacción química adquiriendo solidez, en cuanto este contacto sea constante continua la reacción, es por ello que es importante el curado del concreto (Abanto, 2009).

Según Correia & Rodrigues, 2009 todos los cementos tipo Portland en base a sus especificaciones pueden ser empleados en el CAC y que usualmente se emplea entre 200 y 450kg/m³ de cemento en el CAC y cuando la mezcla posee menos de 300kg/cm³ se debe añadir algún material cementoso como polvo, ceniza, etc.

Agregados. También conocidos como áridos, el agregado destinado a la elaboración de concretos es un conglomerado de partículas pétreas cuya naturaleza ya sea natural o artificial con posibilidades de ser modificadas para el uso pertinente. Se clasifican por su gradación en agregado fino y grueso (NTP 400.011, 2008).

Los agregados destinados al empleo del CAC deben cumplir los mismos requisitos a emplearse en un concreto convencional, también debe considerarse que el diámetro máximo del esqueleto granular debe ser de ¾" (Correia & Rodrigues, 2009).

El empleo de agregados lavados dará un concreto con mayor consistencia y debe tenerse cuidado de no cambiar el tipo de agregado a emplearse ya que esto produce una variación significativa en las propiedades del concreto ya que la forma, el tamaño y gradación del agregado afecta al empaquetamiento del esqueleto granular. Algunos métodos de diseño de mezclas consideran el contenido de vacíos de los agregados para dosificar volúmenes de pasta y mortero (EFNARC et al., 2005).

Agregado Grueso. Se denomina agregado grueso a los agregados que quedan retenidos por el tamiz N° 4 y consiste en un conglomerado de gravas o piedras chancadas.

Según Okamura & Ouchi (2003) existen muchos factores que caracterizan la autocompactabilidad, entre ellos uno de los más importantes es el tamaño máximo del agregado grueso; estos estudios están descritos en términos de resultados de pruebas que realizaron para morteros y para mezclas de concreto. Los resultados muestran que para que este concreto fluya el tamaño máximo del agregado grueso debe ser un poco menor a la distancia mínima de refuerzos estructurales según sean las solicitaciones.

El tamaño máximo del agregado en este tipo de concreto por lo general debe delimitarse entre ½” y ¾” para lograr un concreto que atraviese obstáculos, adicionalmente la gradación y la forma del agregado influyen en la fluidez y la capacidad de paso del concreto autocompactante (EFNARC et al., 2005).

Agregado Fino. El agregado fino se define como los agregados que pasan la malla N°4 y quedan retenidos por la malla N° 200 y consisten en arenas de origen natural, artificial o una combinación de ambos. La NTP 400.011 (2008), establece que el agregado fino a emplearse en concreto debe estar dentro de la siguiente gradación:

Tabla 1

Requerimientos de granulometría para el agregado fino

Tamiz	Porcentaje que pasa
3/8	100
N° 4	95 a 100
N° 8	80 a 100
N° 16	50 a 85
N° 30	25 a 60
N° 50	5 a 30
N° 100	0 a 10
N° 200	0 a 3

Nota. Fuente: (NTP 400.011, 2008)

La importancia del agregado fino en el CAC es significativamente mayor que la del agregado grueso. Un volumen alto de pasta en estas mezclas logra disminuir la fricción interna de las partículas de agregado fino, aunque es considerable la distribución granulométrica del agregado al momento del diseño de mezclas (EFNARC et al., 2005)

Agua. El agua a utilizarse en la combinación del cemento es de inclinación potable, en caso de que no sea potable su empleo se ve condicionado a la existencia de elementos perjudiciales al concreto como ácidos, aceites, álcalis, sales y otros elementos. Los elementos perjudiciales presentes en los agregados y aditivos deben considerarse a las sustancias nocivas presentes en el agua para evaluar el total de sustancias perniciosas. (NTE E.060, 2009)

Aditivo. Son elementos incluidos a los componentes básicos del concreto buscando variar una o más propiedades del concreto típico para el objetivo que se tenga trazado. En la actualidad se tiene una gran variedad de aditivos empleados en base a diferentes requerimientos de los proyectos que se quiera realizar.

Los aditivos superplastificantes y modificadores de la viscosidad son los más empleados en el CAC mientras que los menos usados son los desarrolladores de aire, para la utilización de los aditivos se deben cumplir requisitos reglamentarios propios de cada país. (Correia & Rodrigues, 2009)

Tipos de Aditivos. La ASTM C 494-82 establece los siguientes tipos de aditivos:

- Tipo A: Reductor de agua.
- Tipo B: Reductor de agua.
- Tipo C: Acelerador de fraguado.
- Tipo D: Reductor de agua y retardador.
- Tipo E: Reductor de agua y acelerador.
- Tipo F: Reductor de agua de alto rango.

- Tipo G: Reductor de agua de alto rango y retardador.

Aditivo Superplastificante: esta clase de aditivos (Tipo F) mejoran las características de fluidez del concreto y estableciendo una relación agua/cemento reducido de valores entre 0.25 a 0,40 en parte debido a la absorción y la consecuencia de ruptura de partículas de cemento. Manteniendo la trabajabilidad y resistencia del concreto. Son empleados generalmente en edificaciones con alta densidad de acero o concretos con elevados asentamientos. Además de ello estos aditivos reducen la segregación y aumentan el tiempo de vida. (Sika, 2022)

El empleo de un aditivo superplastificante en un CAC es ineludible ya que este provee de fluidez a la mezcla y reduce la tensión superficial del agua, existe una gran variedad de aditivos superplastificantes en el mercado y año a año se desarrolla más esta tecnología. Estos aditivos son reductores de agua y provee una gran trabajabilidad a las mezclas (Correia & Rodrigues, 2009)

Propiedades del Concreto Autocompactante en Estado Fresco

La forma de lograr la autocompactabilidad va más allá de tener una pasta con alta viscosidad, se pretende obtener una mezcla con una cohesión entre los componentes con el fin de tener una mezcla homogénea, de forma que se acapare todo el encofrado sin tener segregación ni tener bloqueo al fluir a través de los refuerzos de acero. Dichas características plantean las propiedades del CAC que son la capacidad de llenado, la resistencia a la segregación y la capacidad de paso, dichas propiedades son distintas a las características de un concreto típico (Correia & Rodrigues, 2009).

Según EFNARC et al., (2005) las propiedades del CAC sobrepasan en estado fresco los márgenes y límites perdiendo su autocompactabilidad, llegando a requerirse distintos métodos de prueba para verificar si una mezcla es apta, se pueden definir las siguientes pruebas empíricas:

Tabla 2

Métodos de prueba para evaluar las características del concreto autocompactante

Propiedad	Método de Prueba
Capacidad de llenado	Prueba de Flujo de Asentamiento T50 o Prueba de Embudo “V”
Capacidad de paso	Prueba de Caja en “L”
Resistencia a la segregación	Prueba de resistencia a la segregación

Nota. Fuente: (EFNARC et al., 2005)

Capacidad De Llenado. Es la capacidad del mortero de CAC en estado fresco de poder fluir y abarcar todos los espacios reducidos, angostos o poblados de acero de refuerzo en los encofrados debido a su propio peso sin perder la homogeneidad en la mezcla, interviniendo principalmente el tamaño máximo del agregado con el que se trabajara, la geometría y la densidad de refuerzo del encofrado (Correia & Rodrigues, 2009).

Resistencia a la Segregación. En las pastas de Concreto autocompactante la mezcla tiene que estar uniforme, homogénea y cohesiva, en la segregación existe una disposición variable de los elementos que conforman la pasta es decir los agregados tienden a moverse a un lado de la mezcla.

La resistencia a la segregación es una propiedad imprescindible para que una mezcla de CAC adquiera esa fluidez que lo caracteriza, el CAC puede llegar a padecer de segregación al momento del vaciado o en su endurecimiento, siendo este último el más pernicioso y puede provocar imperfecciones en superficies horizontales.(EFNARC et al., 2005)

Capacidad De Paso. La capacidad de paso es una propiedad que se define como la habilidad que tiene el CAC de poder fluir a través de armaduras de acero y zonas estrechas sin retención de la pasta ni pérdida de la homogeneidad de la mezcla. Se toma en cuenta para evaluar esta capacidad el espaciamiento entre refuerzos de acero (EFNARC et al., 2005).

Ensayos Preliminares del Concreto Autocompactante

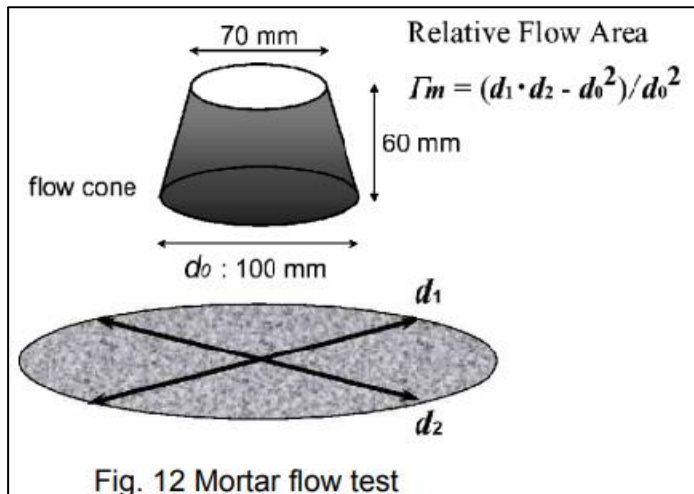
Mini Slump y V-Funnel del Mortero. Uno de los factores que determinan el grado de autocompactabilidad es la del rol del mortero como un fluido en este tipo de concreto, para que la mezcla adquiera su fluidez característica. Está demostrado que la viscosidad y deformabilidad del mortero son indispensables para la fluidez del agregado grueso a través de obstáculos sin llegar a segregarse para lo cual empíricamente se toman estas pruebas (Okamura & Ouchi, 2003).

Equipos para realizar la prueba. Se requieren los siguientes equipos para poder desarrollar esta prueba

- Una superficie plana, horizontal, no absorbente y nivelada de trabajo, con un área lo suficientemente grande para trabajar; de preferencia de metal o acero, cuyas dimensiones sean de como mínimo 500mmx500mm
- Un cono de acero hueco cuyas dimensiones se mencionan en la figura 2 para realizar la prueba de mini slump, cuyas superficies deben ser lisas y firmes.
- Un embudo de acero en “V” creado con las dimensiones indicadas en la figura 2 y con una tolerancia de $\pm 1\text{mm}$ provisto de una rendija para poder abrir y cerrar el embudo en la base, sus superficies deben ser lisas y firmes ante la pasta de mortero.
- Un recipiente metálico y un badilejo
- Una cinta metálica para medir distancias
- Un cronometro

Figura 2

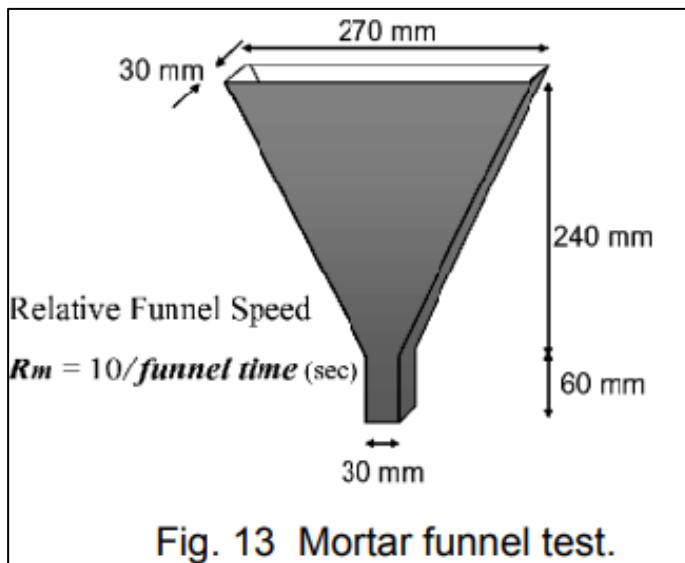
Cono de acero hueco para prueba de mini slump



Nota. Fuente:(Okamura & Ouchi, 2003)

Figura 3

Embudo en forma de “V” para prueba de V-Funnel del mortero



Nota. Fuente:(Okamura & Ouchi, 2003)

Procedimiento a realizar. Luego de mezclar la arena con el cemento y agua para una capacidad de aproximadamente 2 litros en el recipiente y alcance la textura de mortero, se procede colocar la superficie de acero horizontal y nivelada, se humedece la base y el interior del cono hueco, luego se coloca el cono sobre dicha superficie condicionado por el peso de la

persona que ensaye, luego se toma la mezcla y se introduce en el cono, el exceso de mortero se desprenderá con un badilejo, posteriormente se levanta el cono de forma suave en un solo movimiento para que el mortero pueda fluir libremente.

Luego se registra el valor de los diámetros perpendiculares, se debe tomar en cuenta que los diámetros deben estar entre los valores de 24 y 26cm. Además de ello se tiene el parámetro de Área de Flujo Relativo (Γ_m) definido de la siguiente forma: (Okamura & Ouchi, 2003)

$$\Gamma_m = \frac{d_1 d_2 - d_0^2}{d_0^2}$$

Donde:

Γ_m : Área de Flujo Relativo

d_1 y d_2 : Diámetros de Flujo Medidos

d_0 : Diámetro del Cono (10cm)

Para el ensayo de V-Funnel se nivela el embudo en “V”, se humedece el interior del embudo y se debe colocar un recipiente debajo de la compuerta del embudo para vaciar el mortero, posteriormente se debe tomar el remanente de mortero empleado y se vierte sobre el embudo, luego con el badilejo se retira el excedente de concreto de la parte superior del embudo, tras esperar unos 10 segundos se abre la compuerta del embudo y simultáneamente se debe prender el cronometro y registrar el tiempo t que demora el mortero en fluir desde que se abre la compuerta hasta que se logra ver la escotilla.

El tiempo t debe estar entre 7 y 11 segundos, adicionalmente se tiene el parámetro R_m que es la Velocidad Relativa del Embudo, definido de la siguiente forma: (Okamura & Ouchi, 2003)

$$R_m = \frac{10}{t}$$

Prueba de Slump Flow y Índice de Estabilidad Visual (VSI). Esta prueba se desarrolló en Japón en los años 1990 y radica en determinar si la mezcla de CAC sometida a una fuerza producto de su propio peso puede alcanzar una determinada distancia en un tiempo estimado. Esta prueba se emplea para verificar la capacidad de llenado de la mezcla ya que esta estrictamente relacionada a la fluidez, además de su relativa sencillez y ejecución ya que se emplea el cono de Abrams, que también es utilizado en un concreto típico (Correia & Rodrigues, 2009)

Equipos para realizar la prueba. Se requieren los siguientes equipos para poder desarrollar esta prueba:

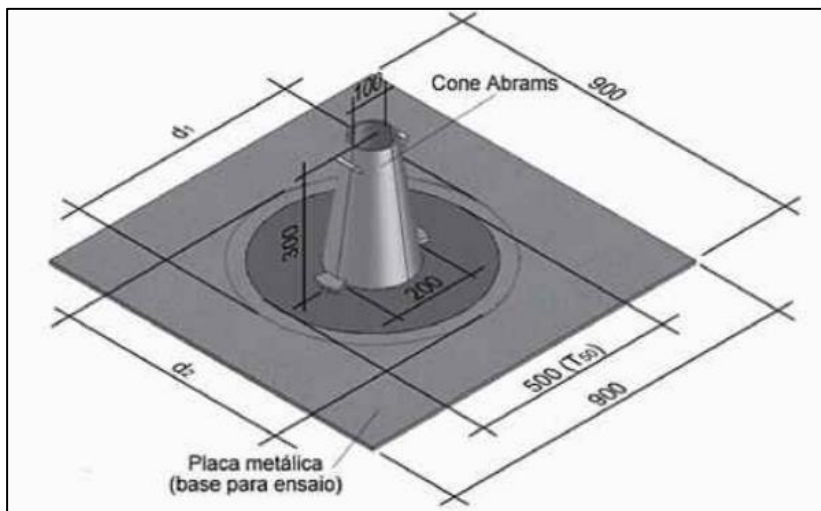
- Una placa de forma cuadrada de área plana, lisa, no absorbente y nivelada, de 2mm de espesor mínimo y cuya superficie sea al menos de 900mm x 900mm en la que se realizara la prueba y se debe evitar la deformación en dicha placa (EFNARC et al., 2005).
- Un Cono de Abrams cuyo diámetro superior sea de 10cm y de un diámetro menor a 20cm, su altura deberá ser de 30cm.
- Una cuchara tipo cucharón y una espátula.
- Un cronometro.
- Una cinta métrica de metal cuya distancia mínima sea de 90cm.

Procedimiento a realizar. Primeramente, se deberá colocar nuestra base de 90cm x 90cm sobre una superficie regular y nivelada horizontalmente. Después de esto se deberán realizar dos marcas circulares en el centro de la base, de 20cm y 50cm de diámetro, luego de humedecer la base y el interior del cono de Abrams, se colocará el cono invertido sobre la marca de 20cm de diámetro esto apoyado por el peso del individuo a realiza la prueba como se muestra en la figura 4, luego de esto se toma unos 6 o 7 litros de mezcla de CAC y se procede a colocar

en el interior del cono sin ningún tipo de compactación mecánica, el exceso de concreto en la parte superior del concreto se retirara con la ayuda de la cuchara y la espátula. Se levantará de forma ligera el cono de un solo movimiento de manera que por debajo del cono la mezcla comience a fluir sin ninguna obstrucción, simultáneamente al levantar el cono se deberá prender el cronometro (Correia & Rodrigues, 2009).

Figura 4

Prueba de flujo de asentamiento



Nota. Fuente: (Correia & Rodrigues, 2009)

Una vez que el concreto alcance a la marca realizada de 50cm en la placa se detendrá el cronometro y se tomará como dato el tiempo que tardo desde levantar el cono, este será registrado como tiempo de flujo T_{50} . Cuando el concreto deje de fluir sobre la base, se deberán medir los diámetros perpendiculares denominándolos d_1 y d_2 para posteriormente determinar su promedio y denominarlo diámetro de dispersión final D_{final} . T_{50} debe estar entre 3.5 y 6 segundos y D_{final} debe estar entre 60 y 75cm. (EFNARC et al., 2005)

Adicionalmente se debe tomar en cuenta que la estabilidad de una mezcla de concreto autocompactante puede evaluarse de manera visual examinando la mezcla después de realizar el ensayo del flujo de asentamiento, por lo que se contará con el índice de estabilidad visual

(VSI) como control de calidad de las mezclas de concreto autocompactante. (ASTM C1611, 2009)

Tabla 3

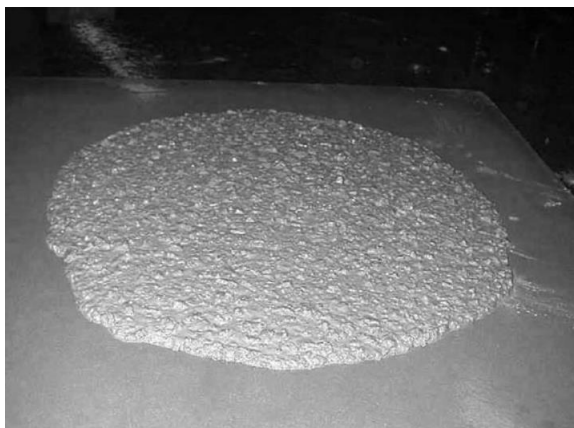
Criterios del VSI

Valor del VSI	Criterios
0= Altamente Estable	No hay evidencia de segregación o sangrado
1- Estable	No se observó evidencia de segregación y se observó un ligero sangrado como un brillo en la masa de hormigón.
2= Inestable	Un ligero halo de mortero de 10 mm (0,5 pulg.) y/o agregado se acumula en la masa de concreto.
3= Altamente Inestable	Clara segregación por la evidencia de un gran halo de mortero > 10 mm (0,5 pulg.) y/o una gran acumulación de agregados en el centro de la masa de hormigón.

Nota. Fuente: (ASTM C1611, 2009)

Tabla 4

Valores del índice de estabilidad visual



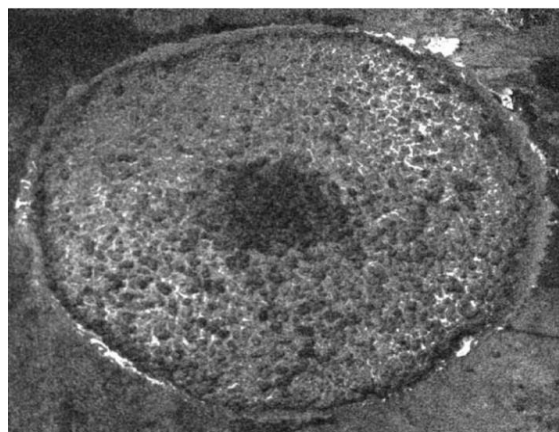
VSI=0 - La masa del hormigón es homogénea y no hay evidencia de exudación



VSI=1 - El hormigón muestra un ligero sangrado observado como un brillo en la superficie



VSI=2 - Evidencia de un halo de mortero y brillo de agua



VSI-3 - Concentración de agregado grueso en el centro de la masa de hormigón y presencia de un halo de mortero

Nota. Fuente: (ASTM C1611, 2009)

Aceptación de las mezclas. La ACI 237R-07 establece un rango aceptable del flujo de asentamiento de entre 450 y 760 mm, cuanto mayor sea este valor la mezcla podrá avanzar más por acción de sí misma, también mide la consistencia del concreto autocompactante y los diámetros perpendiculares medidos no deben diferir entre sí por más de 5cm.

Mientras que el valor de T_{50} es un indicativo indirecto de la viscosidad, cuando se tenga valor elevado indica que la mezcla es mas viscosa, se considera mezclas con un tiempo apropiado para T_{50} de 2 segundos o menos como una mezcla de concreto autocompactante con baja viscosidad, mientras que mezclas con tiempos mayores a 5 segundos son considerados de alta viscosidad (ACI 237R-07, 2007).

Por otro lado, las federaciones europeas consideran valores destinados a usarse en diferentes elementos estructurales y establece que mezclas con un flujo de asentamiento entre 520 y 900mm son aceptables en el uso de concreto autocompactante y los caracteriza de la siguiente manera:

Tabla 5

Rango de aplicaciones para el tipo de asentamiento del concreto autocompactante

Slump Flow en mm	Tipo	Aplicaciones
520 a 700	SF1	Estructuras de concreto no reforzadas o ligeramente reforzadas que se vacían desde cierta altura (losas,) o secciones pequeñas evitando un flujo horizontal largo (cimientos profundos)
640 a 800	SF2	Es adecuada para muchas aplicaciones típicas (paredes, columnas o vigas)
740 a 900	SF3	Se utiliza en estructuras que presenten una alta densidad de acero, con estructuras complejas, generalmente da un mejor acabado que el SF2 pero la resistencia a la segregación es más complicada de controlar

Nota. Fuente:(EFNARC et al., 2005)

De manera similar se tienen los parámetros establecidos para categorizar las mezclas en base al flujo de asentamiento T_{50} de la siguiente manera:

Tabla 6

Características de la mezcla en base al flujo de asentamiento T_{50}

T50 en (s)	Tipo	Características
≤ 2	VS1	Posee una excelente capacidad de llenado, incluso con una alta densidad de acero, tiene la capacidad de autonivelarse y posee un gran acabado superficial, pero sin embargo es susceptible a segregarse
> 2	VS2	Si el valor es menor a 5 se considera con una moderada viscosidad, a pesar que no fluya de manera rápida se considera que es menos peligroso que se genere la resistencia a la segregación

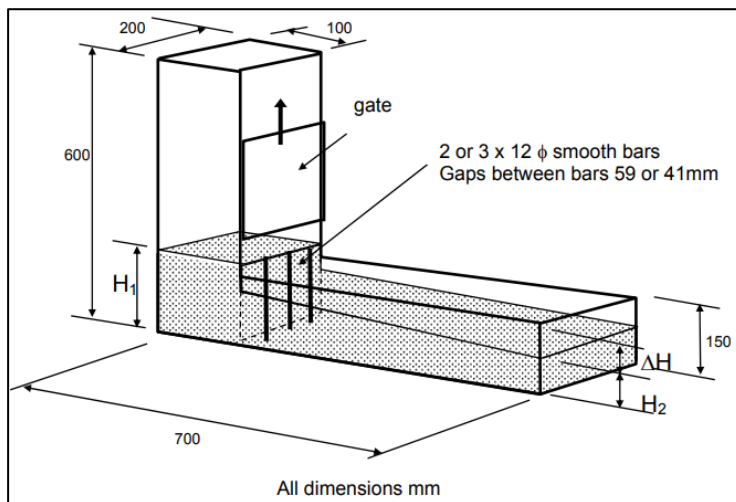
Nota. Fuente: (EFNARC et al., 2005)

En cuanto al VSI establece que mezclas con un VSI de valor 0 o 1 son indicativos que la mezcla es adecuada para el concreto autocompactante mientras que valores de 2 o 3 pueden presentar problemas de segregación por lo que no debe emplearse en este concreto (ACI 237R.07, 2007).

Prueba de la Caja en “L”. El ensayo de la caja en L pretende de forma empírica evaluar la capacidad de paso del CAC, dicha prueba consiste en determinar si la mezcla es capaz de fluir en medio de encofrados llenos de armadura, mide la capacidad del concreto de poder superar obstáculos (Correia & Rodrigues, 2009)

Figura 5

Plano general de la caja en L



Nota. Fuente: (EFNARC et al., 2005)

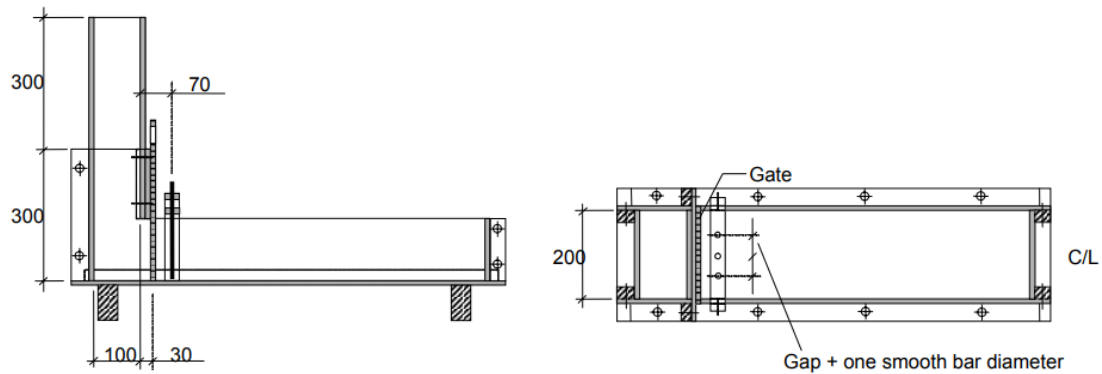
Equipos para realizar las pruebas.

- Caja en “L”, con las medidas que muestran en la figura y tolerancia ± 1 mm, dicha caja debe tener superficies lisas, planas y que no se desgaste con el concreto que será puesto a prueba además de ser inoxidable, la zona vertical de la caja puede ser removible para la limpieza cómoda, debe tener entre 12.6 y 12.8 litros de capacidad en la zona vertical. Se tendrán 3 barras lisas de 12mm de diámetro espaciadas cada 40mm y una compuerta para realizar la prueba y deben existir marcas a los 20 y 40cm de la compuerta en la zona horizontal de la caja. (EFNARC et al., 2005)
- Una cuchara tipo cucharón y una espátula
- Un balde

- Dos cronómetros
- Una cinta métrica de por lo menos 60cm

Figura 6

Dimensiones y diseño de la caja en L



Nota. Fuente: (EFNARC et al., 2005)

Procedimiento a Realizar. La caja en L debe humedecerse internamente y estar horizontalmente nivelada. La sección vertical de la caja se llena con 12 litros de CAC y tras una espera de 30 segundos para visualmente observar algún signo de segregación se levanta la compuerta y la mezcla de concreto fluirá a la sección horizontal de la caja. Al momento de abrir la compuerta se activarán ambos cronómetros y se tomarán los tiempos T_{20} y T_{40} que son respectivamente el tiempo que tarda la mezcla en alcanzar 20 y 40cm en la zona horizontal. Al momento en el que el concreto deje de fluir se registrará la altura al final de la zona horizontal H_2 y la altura del remanente en la zona vertical H_1 de la caja en L. Con estos parámetros se define la relación de bloqueo RB como la relación entre H_2 y H_1 teniendo en cuenta que para un CAC $RB \geq 0.8$ (Correia & Rodrigues, 2009).

$$RB = \frac{H_2}{H_1}$$

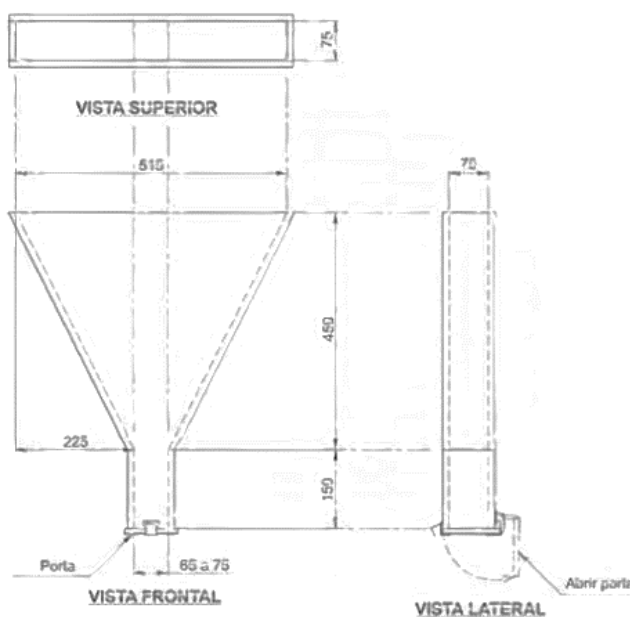
Aceptación de las mezclas. La normativa ACI 237R-07 establece que la proporción de alturas mínima es de 0.8, en un caso hipotético donde la mezcla tenga el comportamiento del

agua se alcanzaría una proporción de 1.0, mientras H_2/H_1 esté mas cerca del valor de 1.0 el fluido tendrá mejor capacidad de paso, también se puede analizar visualmente si existe la presencia de segregación, debe ajustarse la mezcla hasta obtener los valores óptimos. Las federaciones europeas por otro lado consideran un valor mínimo de 0.75 como aceptable en el empleo de concretos autocompactantes.

Prueba del Embudo “V”. Esta prueba se desarrolló en la Universidad de Tokyo con la finalidad de imitar el comportamiento del CAC frente el atravesar una sección de refuerzo estrecho bajo la acción de su propio peso y de esta forma evaluar empíricamente la capacidad de llenado y la resistencia a la segregación de la mezcla ya que en caso exista el concreto no fluiría por la apertura del embudo. Esta prueba mide el tiempo que se requiere para que una mezcla de aproximadamente 10 litros fluya completamente a través de un orificio interior de un embudo como se muestra en la figura 7, la sección debe medir una mínima distancia de 3 veces el tamaño máximo del agregado, en las pruebas de CAC debe variar entre 6.5 a 7.5cm (Correia & Rodrigues, 2009).

Figura 7

Embudo "V"



Nota. Fuente: (Correia & Rodrigues, 2009)

Equipos para realizar la prueba.

- Embudo en “V” creado con las dimensiones indicadas y con una tolerancia de $\pm 1\text{mm}$ provisto de una rendija para poder abrir y cerrar el embudo en la base y apoyada de forma que la parte superior quede horizontal, estará fabricado de metal inoxidable y sus superficies deben ser lisas y firmes ante la pasta de cemento. (EFNARC et al., 2005)
- Recipiente con un volumen mayor a 12 litros.
- Cronómetro.
- Una cuchara tipo cucharón y una espátula.

Procedimiento a realizar. El embudo en “V” cuya abertura por donde entrara el concreto debe estar nivelada se posiciona verticalmente sobre una superficie plana y regular, se debe humedecer las superficies del embudo y colocar por debajo un recipiente que retendrá la pasta que pase. El embudo se llena con 10 litros de mezcla sin compactar, luego se retirará con la cuchara la excedencia de concreto de la parte superior del embudo. Luego de esperar 15 segundos se abre la rendija de salida, en cuanto esto pase con el cronometro se debe registrar hasta el instante en que se pueda ver la escotilla, se registra el tiempo T_v que será el parámetro representativo. El tiempo de flujo de ensayo T_v debe variar entre 6 y 15 segundos (Correia & Rodrigues, 2009)

Aceptación de las mezclas. El tiempo de descarga es la medida del grado de viscosidad de una mezcla de concreto autocompactante mediante la tasa de flujo del fluido, mientras los valores del tiempo de descarga sean menores la viscosidad del fluido será pequeña, las federaciones europeas contemplan que un tiempo de descarga para un concreto autocompactante de 7 segundos como mínimo y de 27 segundos como máximo, se caracterizan a las mezclas de la siguiente manera:

Tabla 7

Características de la mezcla en base al tiempo de descarga T_v

T_v (s)	Tipo	Características
≤ 10	VF1	Posee una excelente capacidad de llenado, incluso con una alta densidad de acero, tiene la capacidad de autonivelarse y posee un gran acabado superficial, pero sin embargo es susceptible a segregarse
7 a 27	VF2	A pesar que no fluya de manera rápida se considera que es menos peligroso que se genere la resistencia a la segregación

Nota. Fuente: (EFNARC et al., 2005)

Propiedades Mecánicas del Concreto Endurecido

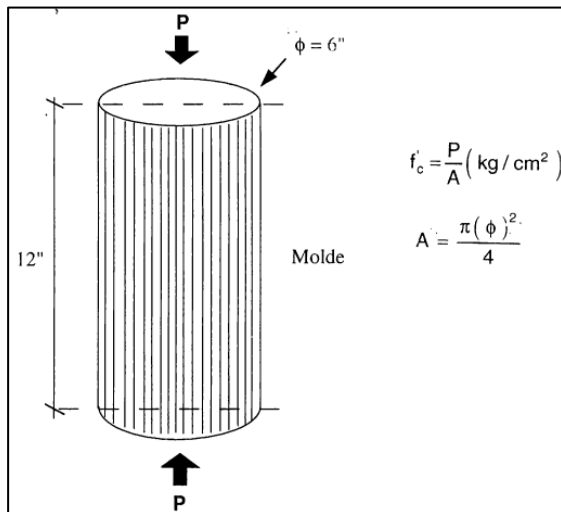
Resistencia a la Compresión (F'_c)

Este parámetro del concreto se entiende como el esfuerzo máximo en compresión axial una vez que la mezcla de concreto se haya mezclado y curado, esta propiedad es un indicativo de las otras propiedades, mientras esta resistencia aumente las demás también mejoran considerablemente. Este ensayo generalmente se realiza a los 28 días de curado. (Abanto, 2009)

Método de Ensayo. Para determinar la resistencia a la compresión se deberá aplicar a un ritmo normalizado una carga de compresión axial a los testigos de concreto como se ve en la figura 8, se evalúa hasta que se produzca la falla de estas briquetas. Con el valor de la carga máxima alcanzada en este ensayo y el área de sección de la cara donde se ejecuta esta prueba se encuentra el valor de la resistencia a la compresión, siendo su cociente. (NTP 339.034)

Figura 8

Briquetas de resistencia a la compresión



Nota. Fuente: (Abanto, 2009)

Equipos. Como se trabaja con una mezcla de CAC no se requerirá de una barra compactadora.

- Briquetas cilíndricas de concreto cuya longitud sea el doble del diámetro de la briqueta y cuyo material debe ser no permeable y que no absorba ni reaccione con el cemento, generalmente su material es de acero y de forma opcional hojalata. (Abanto, 2009)
- Aceite que servirá como lubricante.

Factores que Influyen en la Resistencia.

- La relación agua/cemento: mientras mayor sea la relación agua/cemento menor será la resistencia a la compresión del concreto.
- La relación cemento/agregado.
- Propiedades de los agregados.
- Calidad y dosificación de los componentes.

Módulo de Elasticidad (E_c)

También conocido como Modulo de Young, se mide en las unidades del esfuerzo y se define como la habilidad que poseen los materiales de resistir una deformación en la zona de comportamiento lineal de los materiales, mide la rigidez de los materiales.

El módulo de elasticidad es una de las propiedades más importantes del concreto, empleada en el análisis y/o diseño de las estructuras de concreto, es el grado de flexibilidad de los materiales. El comportamiento en cuanto a las deflexiones se rige por esta propiedad del concreto y por ende define la viabilidad de los materiales. Las normas actuales existentes en cada país establecen una correlación entre el módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión. (Gadve & Ranges, 2022)

Método de Ensayo. La ACI 237R-07 establece varias ecuaciones para encontrar el módulo de elasticidad en base a la resistencia del concreto y el peso unitario.

- Para concretos cuyo peso unitario este entre 1500 y 2500 kg/m³ se tiene:

$$E_c = w_c^{1.5} * 0.043\sqrt{f'_c} \text{ (MPa)}$$

- Para concretos con una densidad o peso unitario mayor se tiene:

$$E_c = 57000\sqrt{f'_c} \text{ (MPa)}$$

Donde:

E_c : Módulo de Elasticidad del concreto (MPa)

f'_c : Resistencia a la compresión del concreto (MPa)

w_c : Peso Unitario del Concreto (kg/m³)

Módulo de Rotura (fr)

El módulo de rotura es la resistencia que presenta el concreto a esfuerzos perpendiculares a su luz, en el concreto generalmente toma un valor de entre 10 a 20% de la resistencia a la compresión y depende de distintos factores como la forma o gradación de los agregados.

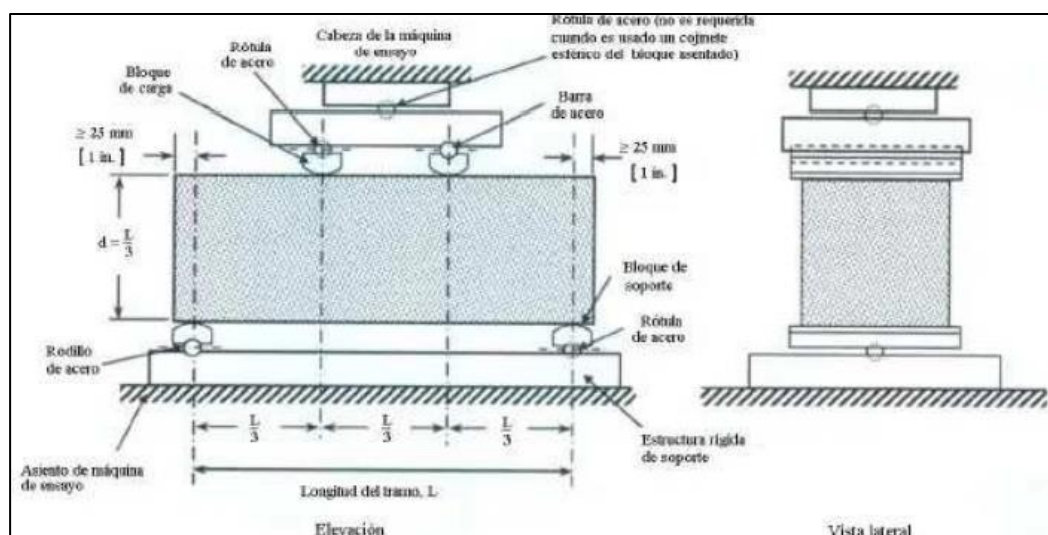
Método de Ensayo. El módulo de rotura se determina por el ensayo de la resistencia a la flexión en viguetas de concreto curadas y consiste en someter una carga a los tercios de la luz de viguetas a velocidad constante hasta que se genere la falla dentro del tercio central o a una distancia que no sea más del 5% del largo de la vigueta.(NTP 339.078, 2012)

Equipos.

- Una máquina de ensayos que aplique una carga a velocidad constante sin interrupciones de algún tipo.

Figura 9

Diagrama de una máquina para ensayar la resistencia a la flexión



Nota. Fuente: (NTP 339.078, 2012)

- Placas de apoyo empleados en los tercios de la vigueta para que el ensayo se realice de forma perpendicular a la vigueta

Procedimiento. La NTP 339.078, 2012 establece el siguiente procedimiento:

- Esta prueba se realizará lo más antes posible luego de retirar los especímenes de la poza de curado ya que las vigas superficialmente secas dan resultados menores en cuanto al módulo de rotura
- Se colocará la viga previamente rotulada en los tercios centrales sobre los apoyos ubicándolos sobre los extremos y el borde del tercio central
- Posteriormente se aplica una carga de 0.86MPa/minuto de forma constante hasta que se llegue al punto de ruptura

En caso de que la falla de la viga se produzca en el tercio central de la viga se considera el módulo de rotura con la siguiente ecuación:

$$M_r = \frac{PL}{bh^2}$$

Donde:

M_r : Modulo de Rotura en (MPa)

P : Carga Máxima en la cual se provoca la rotura (N)

L : Luz libre entre apoyos de la vigueta (mm)

b : Ancho de la vigueta (mm)

h : Altura de la vigueta (mm)

Si la viga no falla dentro del tercio central entonces se calculará el módulo de rotura de la siguiente forma:

$$M_r = \frac{3Pa}{bh^2}$$

Donde:

M_r : Modulo de Rotura en (MPa)

P : Carga Máxima en la cual se provoca la rotura (N)

a : Distancia promedio entre la falla y el apoyo que se encuentre mas cerca de la vigueta(mm)

b : Ancho de la vigueta (mm)

h : Altura de la vigueta (mm)

Diseño de Mezclas del Concreto Autocompactante

A pesar de que los métodos para tener un diseño de mezcla del concreto autocompactante es de tipo empírico, lograr encontrar varios diseños de mezclas de CAC no es simple tomando en cuenta que se deben analizar todas las características de los materiales de forma rigurosa y además de ello la mezcla de concreto debe cumplir con las pruebas preliminares para que cumpla las propiedades características del concreto autocompactante: capacidad de llenado, resistencia a la segregación y capacidad de paso ya que la mezcla debe poder fluir sin problemas en los moldes a los cuales está destinado sin tomar en cuenta su forma o geometría.

Generalidades sobre el Procedimiento para la Proporción de Mezcla

Según los estudios de Okamura & Ouchi (2003) en los concretos autocompactantes el volumen de agregado grueso y el volumen de solidos de la pasta de concreto tienen una relación de aproximadamente de 0.50, la relación del volumen de agregado fino y el volumen de los sólidos del mortero es aproximadamente 0.60 y también la fluidez es más alta cuanto menor sea la relación agua/cemento ya que es clave para evitar la segregación.

Si bien el concreto autocompactante se debe en su totalidad a la naturaleza del aditivo a emplearse, esto ocasiona que no se tenga un diseño de mezclas convencional ya que los aditivos

superplastificantes varían en cada país. Es por ello que en la mayor parte de los diseños de mezclas se tienen parámetros en lugar de una secuencia de pasos, siendo el primero desarrollado en Japón y a partir de dicho diseño se implementaron distintos métodos, los mas destacados son los siguientes:

- Método del ACI 237R-07
- Método de Okamura, Ozawa, Maekawa y Ouchi
- Método de EFNARC

Método del ACI 237R-07

Para poder lograr una dosificación del concreto autocompactante se tiene una secuencia de pasos a realizar entre las cuales se deben tener las propiedades de los agregados a emplear, la definición de la relación agua/cemento y la relación mortero/pasta, cabe destacar que luego de definir la dosificación debe ser puesto a prueba para ver si cumplen las propiedades características del CAC. (ACI 237R-07, 2007)

Los pasos son los siguientes:

1. Establecer el flujo de asentamiento del CAC de acuerdo a las solicitaciones del elemento destinado a emplearse de acuerdo a la siguiente tabla.

Tabla 8

Objetivos del flujo de asentamiento

Características de los Elementos		Flujo de Asentamiento (Slump Flow)		
		< 550 mm	550 a 650 mm	> 650 mm
Nivel de Reforzamiento	Bajo			
	Medio			
	Alto			
Forma del elemento	Bajo			
	Medio			
	Alto			
Profundidad del elemento	Bajo			
	Medio			
	Alto			

Importancia del Acabado Superficial	Bajo			
	Medio			
	Alto			
Luz del Elemento	Bajo			
	Medio			
	Alto			
Grosor del Elemento	Bajo			
	Medio			
	Alto			
Contenido de Agregado Grueso	Bajo			
	Medio			
	Alto			
Energía de Colocación	Bajo			
	Medio			
	Alto			

Nota. Fuente: (ACI 237R-07, 2007)

- La capacidad de paso del CAC está estrechamente relacionada con el tamaño máximo nominal y el contenido de este en la mezcla, se debe procurar usar la mayor cantidad de volumen de agregado grueso y el mayor tamaño nominal que sea posible siempre y cuando no afecte a la capacidad de paso y capacidad de llenado de la mezcla en estado fresco, por lo que se debe definir el contenido de agregado grueso basándose en la distancia mínima de las barras de refuerzo a las que este destinado el concreto, la textura de la superficie del agregado y la granulometría. Para los agregados con un tamaño máximo nominal de $\frac{1}{2}$ " o más elevado se aconseja el empleo del 50% del peso unitario y para agregados con tamaño máximo nominal menor a $\frac{1}{2}$ " se considera el mismo volumen del agregado fino como pruebas iniciales a realizar y en base a las propiedades esta relación puede ajustarse (ACI 237R-07, 2007).
- Establecer la relación agua/cemento considerando que los finos considerados del empleo del cemento junto con los finos del agregado generan una estabilidad entre el mortero y el esqueleto granular, evitando la segregación de los materiales. Se considera una cantidad inicial de cemento adecuada entre 385 kg/m³ y 475 kg/m³ para realizar las

pruebas preliminares. La cantidad de cemento se presenta en la tabla 4 y la relación agua/cemento está en la tabla 5 (ACI 237R-07, 2007).

Tabla 9

Rango de valores sugeridos del contenido de cemento

	Flujo de Asentamiento (Slump Flow)		
	< 550 mm	550 a 650 mm	> 650 mm
Contenido de cemento (kg/m ³)	355 a 385	385 a 445	>458

Nota. Fuente: (ACI 237R-07, 2007)

Tabla 10

Resumen de las proporciones de ensayo del concreto autocompactante

Parámetros de Mezcla	Rango de Valores
Volumen Absoluto de Agregado Grueso	28 a 32%
Fracción de Pasta (Calculada en Volumen)	34 a 40% del Volumen de la Mezcla Total
Fracción de Mortero (Calculada en Volumen)	68 a 72% del Volumen de la Mezcla Total
Típica Relación Agua/Cemento	0.32 a 0.45
Contenido de Cemento típico	386 a 475 kg/m ³

Nota. Fuente: (ACI 237R-07, 2007)

4. Determinar el volumen de pasta y mortero considerando que pasta es el volumen de cemento, agua, aditivos y del aire a considerar; el volumen de mortero es el volumen de pasta y agregado fino. Estos volúmenes de pasta y mortero son mayores a la de un concreto típico ya que esto conlleva un aumento del flujo de asentamiento. La tabla 5 presenta estos parámetros, cabe destacar que estos valores son los estimados para realizar las pruebas preliminares en el concreto y mortero. (ACI 237R-07, 2007)
5. Evaluar el aditivo a emplear.
6. Realizar una primera mezcla de pruebas.
7. Evaluar los parámetros de trabajabilidad con las pruebas preliminares del mortero y concreto

8. Ajustar las proporciones de la mezcla en base a los resultados obtenidos, volver a mezclar hasta que los parámetros se cumplan.

Método de Okamura, Ozawa, Maekawa y Ouchi

Método Racional. Las propiedades de los materiales y sus proporciones afectan a las propiedades del CAC, según Okamura & Masahiro (2003) se debe establecer las proporciones de agregado grueso y fino de forma que solo haga falta variar la relación de agua/cemento y la cantidad de aditivo a emplearse.

Se tiene los siguientes pasos para el diseño de mezclas:

- El agregado grueso a emplearse deberá ser el 50% del volumen de sólidos.
- El agregado fino es el 40% del volumen del mortero.
- La relación en volumen de agua/cemento deberá de estar entre 0.9 y 1.0 dependiendo de las propiedades del cemento.
- Determinar la cantidad de aditivo y la relación agua/cemento de forma que cumplan los requisitos de un concreto autocompactante.

A diferencia de un diseño de mezclas de un concreto convencional donde se fija la relación agua/cemento desde el comienzo del diseño evaluando la resistencia que se quiere adquirir, esto debido a que la fluidez del CAC es muy dependiente a esta relación. Se provee al mortero una alta viscosidad y deformabilidad con el empleo de un aditivo superplastificante dando de esta forma una baja relación agua/cemento y logrando en la mayoría de los casos un concreto con resistencias mayores a las solicitadas en estructuras típicas (210kg/cm²). (Okamura Hajime & Ouchi Masahiro, 2003)

Ajuste de la Relación Agua/Cemento y Dosis de Superplastificante. La viscosidad del mortero depende enormemente de las características del cemento y del superplastificante así como su dosificación en la mezcla, por lo que es inviable establecer previamente estos

parámetros sin realizar pruebas preliminares a las mezclas y evaluar las propiedades del CAC, es por esto que debe realizarse prototipos de diseño de mezclas e ir ajustando hasta cumplir las pruebas de autocompactabilidad como las pruebas al mortero, la caja en “L”, el embudo en “V”, el flujo de asentamiento, etc. Estos métodos sirven para variar la relación agua/cemento o la cantidad de superplastificante evaluando los resultados de estas pruebas. Están estrechamente relacionadas las propiedades al mortero y al concreto.(Okamura Hajime & Ouchi Masahiro, 2003)

Método de la EFNARC

Varias instituciones académicas, empresas constructoras, empresas de aditivos, premezclados y otros contratistas han desarrollado sus propios métodos para la dosificación de mezclas, esto debido a que no se tiene un método riguroso y estereotipado del CAC. La mayoría de diseños trabajan en torno a volúmenes, esto debido a que se tiene que buscar la dosificación donde se llenen los vacíos entre agregados. Algunos testean, analizan y optimizan el mortero antes de evaluar el concreto. La (EFNARC et al., 2005) establece rangos típicos de los elementos del CAC en peso y volumen, si bien no son totalmente restrictivas existirán mezclas cuyos componentes no estén entre estos valores típicos.

Tabla 11

Rangos típicos de los componentes de la mezcla de un concreto autocompactante

Componentes	Rango Típico en Masa (kg/m³)	Rango Típico en Volumen (L/m³)
Cemento	380-600	
Pasta		300-380
Agua	150-210	150-210
Agregado Grueso	750-1000	270-360
Agregado Fino	Normalmente es el 48-55% del peso del agregado total	
Relación Agua/Cemento en volumen		0.85-1.10

Nota. Fuente: (EFNARC et al., 2005)

Se deben utilizar pruebas de laboratorio una vez establecidos los componentes y sus cantidades y variar estas hasta cumplir los requerimientos como capacidad de paso, capacidad de llenado y la resistencia a la segregación, si es necesario debe ajustarse la mezcla.

Conceptos Estadísticos

Modelo de Regresión Lineal Simple

Es la relación lineal estadística más simple que involucra a dos variables: “ x ” cuyos valores son determinados por el observador que se considera como variable independiente, pronosticadora o explicativa e “ y ” que se considera como una variable dependiente; de forma que se tenga el siguiente modelo (Devore, J. 2008).

$$y = \beta_0 + \beta_1 x$$

Se deben realizar registrar varias observaciones de la variable independiente y registrar el efecto que produce en la variable dependiente, con el conjunto de datos (x_n, y_n) se elabora este modelo construyendo una grafica para poder observar la naturaleza de estas variables donde cada punto que representa a estos datos se colocara sobre un sistema de coordenadas y se evalúan por diferentes métodos, entre ellos el de mínimos cuadrados. (Devore, J. 2008)

El objetivo de una regresión lineal simple es estimar los coeficientes β_0 y β_1 a partir de datos muestrales de manera que al trazar la recta $y = \beta_0 + \beta_1 x$ se minimicen la suma de residuos e_i que la diferencia entre el valor de la variable dependiente y obtenido experimentalmente con el valor predicho por el modelo de regresión lineal. Se define la suma residual de cuadrados (RSS) y mediante el método de mínimos cuadrados se busca minimizar este valor. (James et al., 2023)

$$RSS = e_1^2 + e_2^2 + \cdots + e_n^2$$

Con: $e_i = y_i - \hat{y}_i$

Donde:

e_i : i – esimo residuo

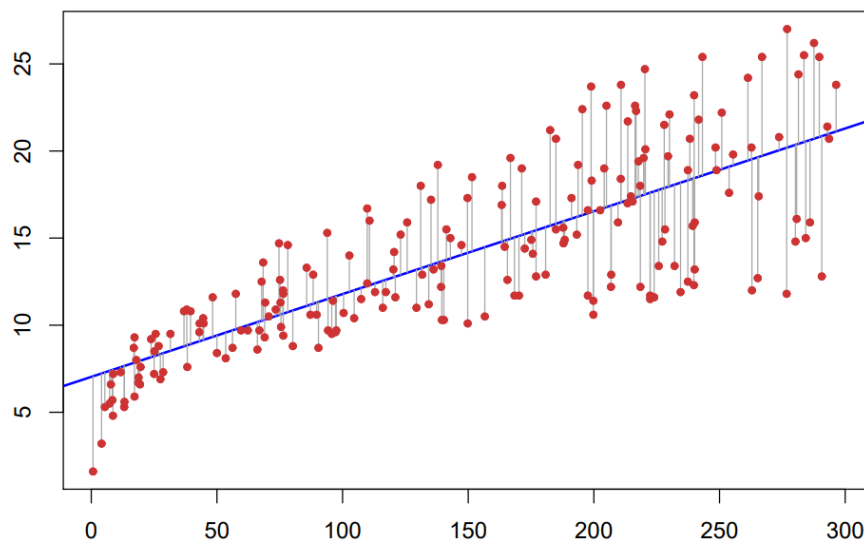
y_i : i – esima observación experimental

$\hat{y}_i$: i – esimo valor predicho

RSS : suma residual de cuadrados

Figura 10

Ejemplo de ajuste de regresión lineal simple mediante el método de mínimos cuadrados



Nota. Fuente: (James et al., 2023)

La relación verdadera entre la variable dependiente e independiente generalmente se desconoce para datos reales, pero la línea de mínimos cuadrados siempre se puede calcular utilizando las estimaciones de coeficientes, en aplicaciones reales, tenemos acceso a un conjunto de observaciones a partir del cual podemos calcular la línea de mínimos cuadrados mientras más datos se tenga del fenómeno a evaluar las estimaciones se acercarán más a la verdadera relación entre estas variables, en estos modelos de regresión se utilizan información de una muestra para estimar las características de una población grande. Ya que si estimamos los coeficientes $\hat{\beta}_0$ y $\hat{\beta}_1$ con un conjunto de datos muestrales no serán los valores reales de β_0 y β_1 pero se acerca bastante a la verdadera línea de regresión poblacional (James et al., 2023)

Error Estándar

El error estándar (SE) sirve para medir que tanto se alejan los valores estadísticos como los coeficientes de regresión, la media poblacional, etc. que son estimados de un conjunto de datos muestrales de los valores obtenidos de los valores poblacionales y se tiene que esta inversamente relacionado con el número de observaciones realizaciones, mientras más datos se tenga este valor será menor.(James et al., 2023)

Error Estándar Residual

Para elaborar los modelos de regresión se requiere conocer la desviación estándar poblacional σ y la varianza σ^2 que miden el nivel de dispersión para una población, sin embargo, estos valores son difíciles de encontrar en la práctica por lo que se estiman a través de una muestra, siendo este conocido como el error estándar residual (RSE) (James et al., 2023)

$$RSE = \sqrt{\frac{RSS}{n-2}} = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

Donde:

RSE: error estándar residual

RSS: suma residual de cuadrados

n: tamaño de la muestra

Todas las observaciones experimentales tienen asociado un término de error ϵ , debido a la presencia de estos términos de error, incluso si conociéramos el modelo de regresión verdadero (es decir, incluso si conociéramos β_i) no podríamos predecir con precisión y a partir de x . El RSE es una estimación de la desviación estándar de ϵ . En términos generales, es la desviación promedio de la respuesta respecto a la regresión verdadera. (James et al., 2023)

En los modelos de regresión el RSE se considera una medida de la falta de ajuste del modelo a los datos. Si las predicciones obtenidas con el modelo son muy cercanas a los valores reales de los resultados, es decir, si $\hat{y}_i \approx y_i$, entonces el RSE será pequeño, y podemos concluir que el modelo se ajusta muy bien a los datos. Por otro lado, si $\hat{y}_i$ está muy lejos de y_i para una o más observaciones, entonces el RSE puede ser bastante grande, lo que indica que el modelo no se ajusta bien a los datos.

Intervalos de Confianza

Los errores estándar se pueden utilizar para calcular intervalos de confianza. Un intervalo de confianza del 95 % se define como un rango de valores tal que, con una probabilidad del 95 %, el rango contendrá el verdadero valor desconocido del parámetro. El rango se define en términos de límites inferior y superior calculados a partir de la muestra de datos. Un intervalo de confianza del 95 % tiene la siguiente propiedad: si tomamos muestras repetidas y construimos el intervalo de confianza para cada muestra, el 95 % de los intervalos contendrá el verdadero valor desconocido del parámetro (James et al., 2023).

Pruebas de Hipótesis

Los errores estándar también se pueden utilizar para realizar pruebas de hipótesis sobre los coeficientes de los modelos de regresión lineal. La prueba de hipótesis más común consiste en probar la hipótesis nula H_0 que indica que no existe relación entre las variables x e y contra la hipótesis alternativa H_a que indica que existe alguna relación entre las variables x e y . (James et al., 2023)

Matemáticamente estas hipótesis se plantean de la siguiente manera:

$$H_0: \beta_i = 0 \text{ versus } H_a: \beta_i \neq 0$$

T-estadístico

Para probar la hipótesis nula, necesitamos determinar si $\hat{\beta}_i$ que es nuestra estimación para β_i , está lo suficientemente lejos de cero como para confiar en que β_i es distinto de cero. Esto depende de la precisión de $\hat{\beta}_i$; es decir, depende del error estándar de $\hat{\beta}_i$ lo que es $SE(\hat{\beta}_i)$. Si $SE(\hat{\beta}_i)$ es pequeño, incluso valores relativamente pequeños de $\hat{\beta}_i$ pueden proporcionar una evidencia sólida de que $\beta_i \neq 0$ y por lo tanto, de que existe una relación entre x e y . Por el contrario, si $SE(\hat{\beta}_i)$ es grande, entonces $\hat{\beta}_i$ debe ser grande en valor absoluto para que podamos rechazar la hipótesis nula. En la práctica, calculamos un estadístico t que mide la cantidad de desviaciones estándar en las que $\hat{\beta}_i$ se aleja de 0 (James et al., 2023).

$$t = \frac{\hat{\beta}_i}{SE(\hat{\beta}_i)}$$

Valor p

Es la probabilidad de obtener un valor del estadístico t igual o más extremo que el observado. En términos generales, interpretamos el valor p de la siguiente manera: un valor p pequeño indica que es improbable observar una asociación tan sustancial entre el predictor y la respuesta debido al azar, en ausencia de una asociación real entre el predictor y la respuesta. Por lo tanto, si observamos un valor p pequeño, podemos inferir que existe una asociación entre el predictor y la respuesta. Rechazamos la hipótesis nula (es decir, declaramos que existe una relación entre x e y) si el valor p es suficientemente pequeño. Los valores de nivel de significancia para rechazar la hipótesis nula son del 5 % o el 1 % (James et al., 2023).

Coefficiente de Determinación R^2

El RSE proporciona una medida absoluta de la falta de ajuste del modelo de regresión a los datos. Sin embargo, dado que se mide en unidades de y , no siempre está claro qué constituye un buen RSE. El coeficiente de determinación R^2 proporciona una medida alternativa

de ajuste. Adopta la forma de una proporción de la varianza explicada y, por lo tanto, siempre toma un valor entre 0 y 1, y es independiente de la escala de y . (James et al., 2023)

Para calcular R^2 se tiene:

$$R^2 = \frac{TSS - RSS}{TSS} = 1 - \frac{RSS}{TSS}$$

Donde:

$$TSS = \sum (y_i - \bar{y})^2 : \text{suma total de cuadrados}$$

TSS mide la varianza total en la respuesta y además que puede considerarse como la cantidad de variabilidad inherente a la respuesta antes de realizar la regresión. Por el contrario, RSS mide la cantidad de variabilidad que queda sin explicar después de realizar la regresión. Por lo tanto, $TSS - RSS$ mide la cantidad de variabilidad en la respuesta que se explica (o elimina) al realizar la regresión, y R^2 mide la proporción de variabilidad en y que puede explicarse utilizando x . Un estadístico R^2 cercano a 1 indica que una gran proporción de la variabilidad en la respuesta se explica por la regresión. Un número cercano a 0 indica que la regresión no explica gran parte de la variabilidad en la respuesta; esto podría ocurrir porque el modelo lineal es erróneo, la varianza del error σ^2 es alta, o ambas cosas. El coeficiente de determinación presenta una ventaja interpretativa sobre el RSE ya que, a diferencia de este, siempre se encuentra entre 0 y 1. (James et al., 2023)

VIF

Es posible que exista colinealidad entre dos o más variables incluso si ningún par de variables tiene una correlación particularmente alta. A esta situación la llamamos multicolinealidad. En lugar de inspeccionar la matriz de correlación, una mejor manera de evaluar la multicolinealidad es calcular el factor de inflación de la varianza (VIF). El VIF es el

factor de inflación de la varianza, es decir, el cociente entre la varianza de $\hat{\beta}_j$ al ajustar el modelo completo y la varianza de $\hat{\beta}_j$ si se ajusta solo. El valor mínimo posible del VIF es 1, lo que indica la ausencia total de colinealidad. En la práctica, suele haber una pequeña colinealidad entre los predictores. Como regla general, un valor del VIF superior a 5 o 10 indica un nivel problemático de colinealidad. (James et al., 2023)

Tabla 12

Interpretación de los VIF

Valor	Interpretación
$VIF \leq 1$	No existe multicolinealidad
$1 < VIF \leq 5$	Las variables están ligeramente relacionadas. Existe un riesgo leve de multicolinealidad. Pero no afecta en el modelo
$5 < VIF \leq 10$	Las variables estas moderadamente relacionadas. Existe un riesgo moderado de multicolinealidad. Existe la posibilidad de que los parámetros de regresión no sean estimados apropiadamente.
$VIF > 10$	Existe multicolinealidad. La variable deberá de ser removida del modelo

Nota. Fuente: Recopilación

Modelo de Regresión Lineal Múltiple

La regresión lineal múltiple es una prolongación de la regresión lineal simple tomando en consideración varias variables independientes " $x_1, x_2, \dots, x_n$ " o variables predictoras para analizar el efecto en la variable dependiente "y" ya que al emplear más de una variable independiente se puede explicar de mejor forma la variación de la variable dependiente. Se deben recolectar los datos de las variables independientes: " $x_1, x_2, \dots, x_n$ " y con estos datos se busca elaborar una ecuación que logre predecir el valor de la variable independiente "y", claro que deben tenerse en cuenta cuan confiable es el modelo obtenido y la fuerza de la relación entre las variables dependientes e independiente. (Mendenhall et al., 2006)

El modelo de regresión lineal múltiple es de la siguiente forma:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots \beta_n x_n +$$

Donde:

y : Variable a predecir o dependiente

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$: Son constantes a determinarse con los datos

$x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$: Variables predictoras o independientes

Al igual que en el caso de la regresión lineal simple, los coeficientes de regresión $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p$ en el modelo son desconocidos y deben estimarse. Dadas las estimaciones $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_p$, podemos realizar las predicciones mediante la fórmula:

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_1 + \hat{\beta}_2 x_2 + \dots + \hat{\beta}_p x_p$$

Los parámetros se estiman utilizando el mismo método de mínimos cuadrados que se emplea en el contexto de la regresión lineal simple. Se eligen $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p$ para minimizar la suma de los residuos al cuadrado RSS por lo que consideramos los valores estimados $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_p$ que son estimaciones de los coeficientes de regresión verdaderos. A diferencia de las estimaciones de regresión lineal simples las estimaciones de los coeficientes de regresión múltiple tienen formas complejas que se representan más fácilmente mediante álgebra matricial. Se recomienda utilizar cualquier programa estadístico para calcular estas estimaciones de coeficientes (James et al., 2023).

Capítulo III

Metodología de la Investigación

Formulación de la Hipótesis

Hipótesis General

HG: Las proporciones de los componentes del concreto autocompactante influyen significativamente en sus propiedades mecánicas, y esta relación puede ser modelada de forma precisa mediante la regresión lineal múltiple.

Hipótesis Específica

HE1: Las proporciones de los componentes del concreto autocompactante influyen significativamente en su resistencia a la compresión, y esta relación puede ser modelada de forma precisa mediante la regresión lineal múltiple

HE2: Las proporciones de los componentes del concreto autocompactante influyen significativamente en su resistencia a la flexión, y esta relación puede ser modelada de forma precisa mediante la regresión lineal múltiple.

HE3: Las variables con mayor peso predictivo en la resistencia a la compresión son el contenido de cemento y el agregado grueso.

HE4: El modelo de regresión lineal múltiple presenta un alto grado de precisión estadística ($R^2 > 0.8$) para estimar la resistencia del concreto autocompactante, con significancia ($p < 0.05$).

Tipo de Investigación

La presente investigación es del tipo aplicada ya que busca dar una solución práctica a un problema real de la ingeniería civil, la optimización de las mezclas de concreto

autocompactante en obras de construcción y la predicción del comportamiento mecánico del concreto autocompactante en función de su dosificación, estos resultados pueden ser utilizados por ingenieros y laboratorios del sector de la construcción.

Alcance de la Investigación

La presente tesis posee un alcance correlacional por que busca establecer una relación matemática mediante la regresión lineal múltiple entre las variables de entrada (componentes del concreto autocompactante) y salida (resistencia a la compresión y resistencia a la flexión), con el fin de predecir el comportamiento mecánico del concreto autocompactante a partir de sus componentes.

Enfoque de la Investigación

La presente investigación posee un enfoque cuantitativo porque se apoya en la recolección y análisis de datos numéricos derivados de los ensayos de las muestras de concreto, información obtenida como resultados de resistencia a la compresión y la resistencia a la flexión del concreto autocompactante. Se utilizarán herramientas estadísticas para interpretar los resultados y generar un modelo predictivo (como ANOVA, regresión lineal múltiple, etc.) y determinar la influencia de cada factor sobre las propiedades mecánicas del concreto autocompactante.

Diseño de la Investigación

El presente estudio se desarrolla bajo un diseño experimental que se centra en la evaluación del comportamiento de las mezclas de concreto autocompactante a diferentes proporciones de sus componentes y la relación con las propiedades mecánicas, específicamente con la resistencia a la compresión y la resistencia a la flexión. El diseño experimental adaptado es intencional y factorial parcial.

El objetivo del diseño adoptado es la determinación de un modelo predictivo de las propiedades mecánicas del concreto autocompactante, a partir de la manipulación de las componentes de la mezcla de concreto autocompactante, este modelo será determinado mediante la técnica estadística de regresión lineal múltiple, esta técnica nos permitirá distinguir cuál de los componentes tienen mayor valor predictivo en las propiedades de resistencia.

Tipo de Diseño Experimental

El tipo de diseño experimental para este estudio es el diseño factorial parcial o reducido con ajustes empíricos o técnicos, debido a que no se probaron todas las combinaciones posibles de las variables predictoras, sino se realizó la selección de algunas de ellas de manera intencional. Este tipo de diseño que se seleccionó fue porque las posibles combinaciones son demasiado grandes, lo que conllevaría a un elevado costo de realizar. Se seleccionan mezclas específicas por sus características técnicas, no al azar. Con este tipo de diseño, se posibilita la investigación de las principales relaciones entre las variables, maximizando el uso de los recursos disponibles.

Número de Tratamientos (Mezclas)

En el presente estudio se diseñaron seis mezclas de concreto autocompactante, lo que corresponde a seis tratamientos experimentales. En cada mezcla varían las proporciones de los componentes (cemento, agua, agregados y aditivo), siguiendo las recomendaciones y directrices de la EFNARC y ACI 237R para lograr la autocompatibilidad adecuada.

- Número de Mezclas (Tratamientos): 6
- Número de variables predictoras: Cemento, Agua, Agregado fino, Agregado grueso, Aditivo.
- Número de Replicas: Para cada mezcla se realizarán replicas para cada propiedad (compresión y flexión), para reducir la variabilidad experimental.

Entonces a continuación se muestra la tabla del diseño factorial parcial o reducido con ajustes empíricos o técnicos donde se tiene solo como único factor con niveles planificados el cemento y los otros factores fueron ajustados en función del desempeño en pruebas de autocompactabilidad, no siguiendo un patrón de niveles fijos combinatorios. Además, para construir la regresión lineal múltiple con datos confiables se requiere aplicar y cumplir la condición mínima de tener más observaciones (n) que variables independientes (k), idealmente $n \geq k+1$ (Montgomery, Peck & Vining, 2012).

Tabla 13

Diseño factorial parcial o reducido con ajustes empíricos o criterios técnicos

Factor	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Nivel 5	Nivel 6
Cemento (kg/m ³)	355.00	385.00	420.00	450.00	475.00	500.00
Agua (lts/m ³)	202.35	219.45	205.80	220.50	202.10	215.00
Agregado grueso (kg/m ³)	807.46	769.09	775.49	793.07	777.08	781.88
Agregado fino (kg/m ³)	886.90	823.73	878.15	798.71	823.95	820.02
Superplastificante (kg/m ³)	2.49	2.43	3.53	3.38	3.90	4.00

Nota. Fuente: Elaboración Propia

Muestras y Réplicas

Las muestras consisten en especímenes de concreto autocompactante que se elaboran a partir de las mezclas previamente diseñadas y para asegurar confiabilidad de los resultados, se realizarán réplicas para cada mezcla y resistencia que se está midiendo.

- Resistencia a la compresión: Se tomarán 20 especímenes por mezcla para medir dicha resistencia.
- Resistencia a la flexión: Se tomarán 10 especímenes por mezcla para medir dicha resistencia.

Condiciones Experimentales

Las condiciones experimentales para la fabricación y curado de las mezclas de concreto son las siguientes:

- Curado: Las muestras se mantendrán bajo condiciones de curado por inmersión en las pozas de curado del laboratorio durante un periodo de 28 días.
- Normas de ensayo: Los ensayos de compresión (NTP 339.034) y flexión (NTP 339.078)

Análisis de los Datos

El análisis estadístico es un paso determinante para la interpretación de los resultados que se obtengan del experimento, este análisis se realizará utilizando el análisis de regresión lineal múltiple para identificar las relaciones entre variables predictoras y la variable de respuesta. Este análisis será de la siguiente manera:

- Modelado de la regresión lineal múltiple para cada propiedad de respuesta (compresión y flexión).
- Selección de las variables significativas utilizando el valor p y el factor de inflación de varianza (VIF).
- Evaluación del modelo mediante los parámetros estadísticos como el R^2 , con el objetivo de asegurar de que el modelo tenga un buen ajuste a los valores observados.

Identificación de Variables e Indicadores

Variable Independiente

Concreto Autocompactante. Es un tipo especial de concreto que, debido a su alta fluidez y estabilidad, se acomoda y compacta por sí mismo gracias a su propio peso, sin necesidad de vibración mecánica, incluso en elementos de alta densidad de refuerzo. Tiene como indicadores los siguientes:

- Diseño de mezcla (composición): Cemento (kg/m³), Agua (lts/m³), Agregado grueso (kg/m³), Agregado fino (kg/m³) y aditivo (% del cemento).

- Propiedades en estado fresco: Ensayos de fluidez en cono de Abrams invertido, Ensayo de caja en “L”, Ensayo V-Funnel.

Variable Dependiente

Propiedades Mecánicas. Son propiedades del concreto que definen la capacidad de resistir las cargas y esfuerzos en estado endurecido.

- Propiedades en estado endurecido: Resistencia a la compresión a los 28 días (kg/cm² o Mpa) y Resistencia a la flexión a los 28 días (kg/cm² o Mpa).

Población de Estudio

Población

La población de estudio está conformada por todas las posibles mezclas de concreto autocompactante que se pueden elaborar a partir de diferentes proporciones de sus componentes en condiciones controladas.

Muestra

El presente estudio emplea un muestreo no probabilístico de tipo intencional o dirigido, ya que las mezclas de concreto autocompactante no fueron seleccionados aleatoriamente, sino a partir de criterios técnicos y experimentales. Cada dosificación fue realizada para evaluar el comportamiento mecánico del concreto autocompactante bajo variaciones controladas en sus componentes y generar datos suficientes para aplicar y alimentar una regresión lineal múltiple.

Aunque las seis mezclas son el objetivo central del diseño experimental, la muestra total elaborado para los efectos de ensayos y análisis estadístico son 120 briquetas y 60 viguetas, porque son los elementos en los que se aplican las pruebas de donde se extrajeron los datos.

La cantidad de repeticiones por mezcla es para buscar generar reducir el error experimental y capturar la variabilidad natural entre probetas de una misma mezcla.

Además, se puede adicionar que la muestra según la tabla 8.6 de la página 214 del libro titulado “Metodología de la Investigación” de (Hernandez Sampieri & Mendoza Torres, 2018), en donde nos indica que el tamaño muestral mínimo en estudios del tipo experimental es de 15 por grupo.

El total de especímenes se distribuyó como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 14

Número de muestra de especímenes (briquetas)

Descripción	Cantidad
Briquetas de concreto autocompactante con cantidad de cemento=355kg/m ³	20
Briquetas de concreto autocompactante con cantidad de cemento=385kg/m ³	20
Briquetas de concreto autocompactante con cantidad de cemento=420kg/m ³	20
Briquetas de concreto autocompactante con cantidad de cemento=450kg/m ³	20
Briquetas de concreto autocompactante con cantidad de cemento=470kg/m ³	20
Briquetas de concreto autocompactante con cantidad de cemento=500kg/m ³	20
TOTAL	120

Nota. Fuente: Elaboración Propia

Tabla 15

Número de muestra de especímenes (viguetas)

Descripción	Cantidad
Viguetas de concreto autocompactante con cantidad de cemento=355kg/m ³	10
Viguetas de concreto autocompactante con cantidad de cemento=385kg/m ³	10
Viguetas de concreto autocompactante con cantidad de cemento=420kg/m ³	10
Viguetas de concreto autocompactante con cantidad de cemento=450kg/m ³	10
Viguetas de concreto autocompactante con cantidad de cemento=470kg/m ³	10
Viguetas de concreto autocompactante con cantidad de cemento=500kg/m ³	10
TOTAL	60

Nota. Fuente: Elaboración Propia

Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Técnicas

En la presente tesis de investigación la técnica empleada fue la observación directa y la medición con instrumentos calibrados bajo condiciones de laboratorio, conforme a las normas nacionales e internacionales.

Instrumentos

La información necesaria se recopiló mediante la utilización de equipos de ensayo de laboratorio y formatos de laboratorio correspondientes a cada ensayo realizado, se tuvo los siguientes formatos:

- Formato 01: Granulometría del agregado grueso (NTP 400.012 - ASTM C 136)
- Formato 02: Granulometría del agregado fino (NTP 400.012 – ASTM C136)
- Formato 03: Contenido de humedad de agregados (NTP 339.185)
- Formato 04: Material fino que pasa la malla 200 (NTP 400.018)
- Formato 05: Peso específico y absorción del agregado fino (NTP 400.022)
- Formato 06: Peso específico y absorción del agregado grueso (NTP 400.021)
- Formato 07: Peso unitario suelto y compactado (NTP 400.017)
- Formato 08: Ensayo de abrasión (NTP 400.019)
- Formato 09: Ensayo de máxima compactación
- Formato 10: Mini slump flow del mortero
- Formato 11: V-Funnel del mortero
- Formato 12: Slump Flow (ASTM C1611/C1611M – ACI237R-07 – EFNARC)
- Formato 13: V-Funnel (ACI237R-07 – DIRECTRICES EUROPEAS HAC 2005)
- Formato 14: L-Box (ACI237R-07 – DIRECTRICES EUROPEAS HAC 2005)
- Formato 15: Resistencia a la compresión (NTP 339.034)
- Formato 16: Módulo de Elasticidad (ACI 237R-07)

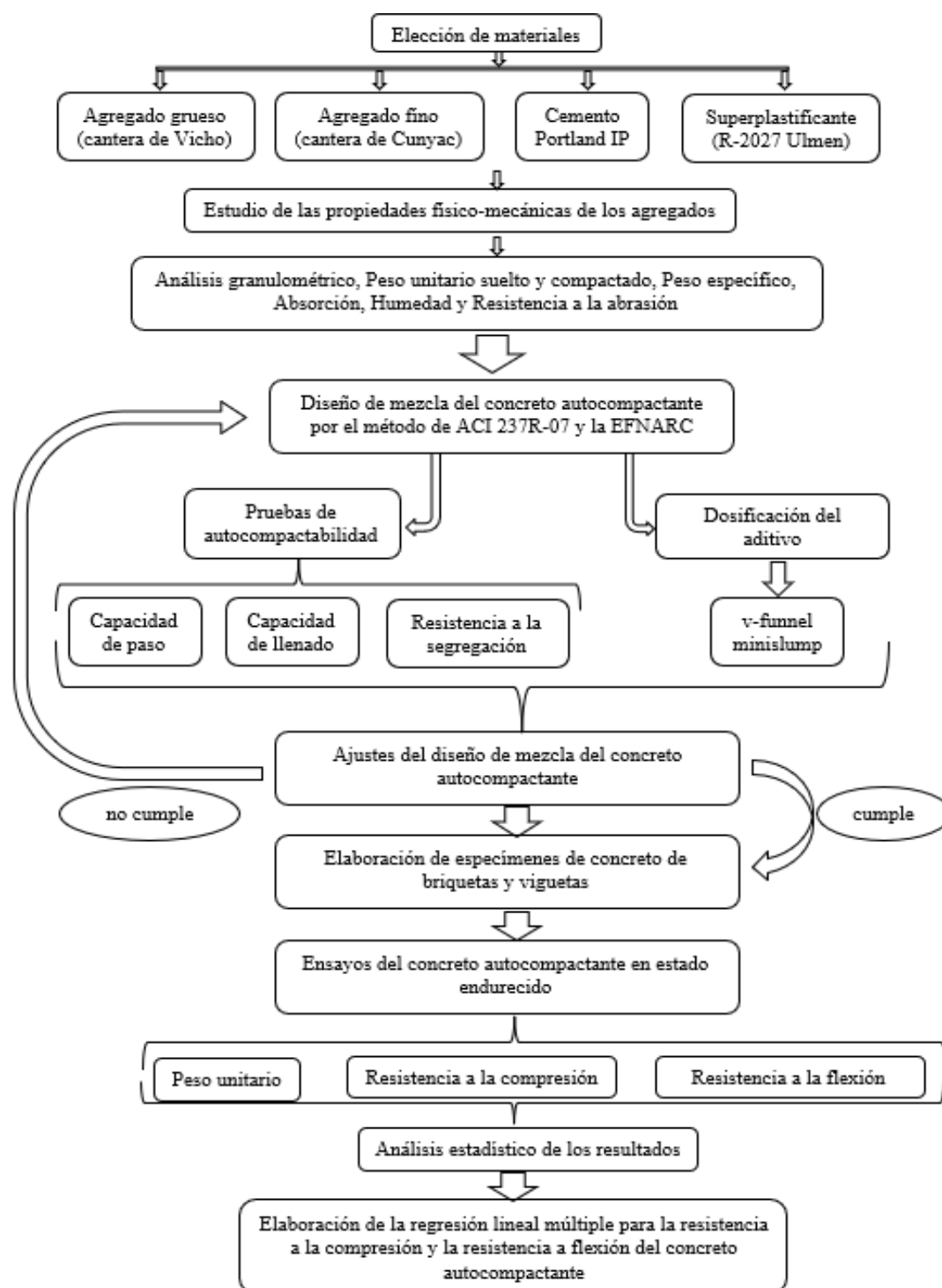
- Formato 17: Resistencia a la flexión (NTP 339.079)

Técnicas de Procesamiento y Análisis de Datos

Para el procesamiento de datos, se realizó la organización y tabulación de la información recolectada en hojas de cálculo, las cuales posteriormente fue procesado con el software estadístico Minitab. En cuanto al análisis se emplearon técnicas estadísticas descriptivas para caracterizar las variables y la regresión lineal múltiple para elaborar el modelo predictivo que relacione las proporciones de los componentes del concreto con sus propiedades mecánicas. La validación del modelo se realizó mediante el análisis de varianza (ANOVA), prueba de significancia de los coeficientes, y evaluación de los residuos.

Flujograma de Trabajo

En la presente investigación el desarrollo de laboratorio constó de la siguientes etapas, en la primera etapa se realizó la caracterización de los agregados a emplearse, en la segunda etapa se ejecutó el diseño y pruebas a las mezclas de concreto autocompactante y finalmente se realizó los especímenes de concreto autocompactante para registrar los valores obtenidos de las propiedades de resistencia y desarrollar su análisis estadístico, este proceso se detalla de mejor manera en el siguiente flujograma:



Recolección de Datos

Exploración de Canteras

En la presente investigación se utilizó como agregado grueso de la cantera de Vicho y agregado fino de la cantera de Cunyac, la selección de estas canteras fue en base a la mayor

representatividad local, canteras que abastecen de agregados a proyectos de construcción en la zona de estudio.

Cantera de Vicho. Ubicada aproximadamente a 9km del trayecto de Cusco a San Salvador y a 40km de distancia de la ciudad del Cusco.

Figura 11

Ubicación de la cantera de Vicho

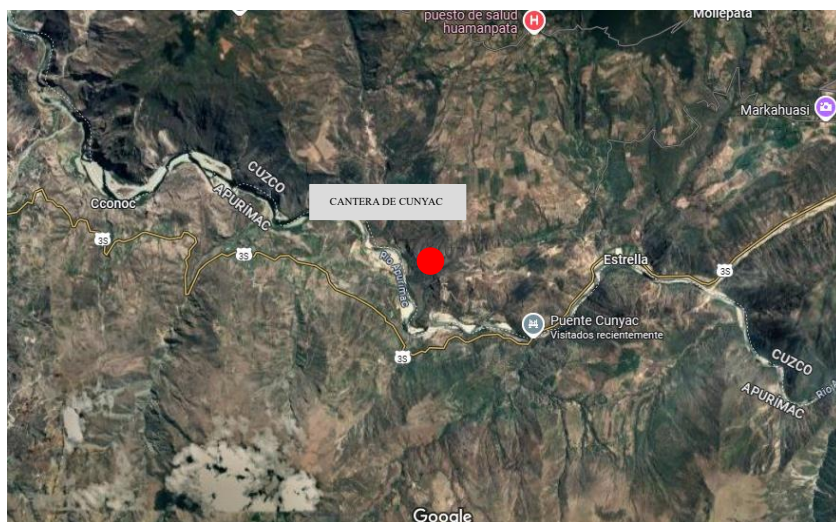


Nota. Fuente: Google Maps

Cantera de Cunyac. Ubicada aproximadamente a 100km de la ciudad del Cusco

Figura 12

Ubicación de la cantera de Cunyac



Nota. Fuente: Google Maps

Ensayos para Determinar las Características de las Propiedades de los Agregados

Granulometría y Módulo de Fineza. La granulometría es uno de los principales ensayos a realizar ya que una apropiada gradación de los agregados es un factor importante en la producción del concreto, provee de trabajabilidad e influye en el diseño de mezclas y la resistencia del concreto. La granulometría es la disposición del tamaño de partículas de los agregados determinados mediante un juego de tamices de aberturas decrecientes.

Normativa. “NTP 400.012: AGREGADOS. Análisis granulométrico del agregado fino, grueso y global.”

Equipos. Agitador mecánico, balanza con sensibilidad 0.1gr, juego de Tamices: 19.000mm (¾”), 12.500mm (1/2”), 9.500mm (3/8”), 4.750 (N°4), 2.360mm (N°8), 1.180mm (N°16), 0.600mm (N° 30), 0.300mm (N° 50), 0.150mm (N° 100), 0.075mm (N°200) y fondo, horno, recipientes, cucharón metálico, franelas, escobillas y brocha.

Muestra.

- *Agregado Grueso:* De acuerdo a la NTP 400.010, la masa mínima de muestra a ensayar de acuerdo al Tamaño Máximo Nominal (TMN) es de 15kg, como se muestra a continuación. sin embargo, se realizará la reducción de la muestra del agregado mediante el cuarteo manual como indica la norma “ASTM C 702-93”.

Tabla 16

Tamaño mínimo de las muestras para el ensayo de granulometría

Tamaño máximo nominal del agregado (mm)	Masa mínima aproximada para la muestra de campo (kg)
Agregado grueso	
9.5	10
12.5	15
19	25
25	50
37.5	75

50	100
63	125
75	150
90	175

Nota. Fuente:(NTP 400.010, 2011)

Figura 13

Reducción de la muestra por cuarteo manual



Nota. Fuente: Elaboración Propia

- *Agregado Fino:* De acuerdo con las recomendaciones de la Norma Técnica Peruana 400.010 la masa mínima es de 10 kg.

Tabla 17

Masa mínima para muestra de campo del agregado fino

Tamaño máximo nominal del agregado (mm)	Masa mínima aproximada para la muestra de campo (kg)
Agregado fino	
2.36	10
4.76	10

Nota. Fuente: NTP 400.012

De esta masa mínima requerida se realizó la reducción de la muestra del agregado siguiendo la normatividad de la “ASTM C 702-93”, mediante el cuarteo manual de la muestra.

Procedimiento en laboratorio. Secar la muestra en el horno a $110 \pm 5^\circ\text{C}$, seleccionar y pesar los tamices y colocarlos en orden decreciente, colocar la muestra a ensayar sobre los

tamices y agitar manualmente, registrar los pesos retenidos en cada uno de los tamices y se le sumara la masa del material más fino que la malla N°200 determinado según la NTP 400.018.

En el agregado grueso se tomará en cuenta los límites del Huso N°67 y en el agregado fino los límites establecidos por la NTP 400.037.

Figura 14

Juego de tamices que se utilizaron en el agregado grueso y fino



Nota. Fuente: Elaboración Propia

Figura 15

Distribución de agregado grueso de Vicho y agregado fino de Cunyac



Nota. Fuente: Elaboración Propia

Cálculos.

$$\%_{\text{retenido}} = \frac{\text{Peso retenido en los tamices}}{\text{Peso total de la muestra}} * 100$$

$$MF = \frac{\sum \text{Porcentaje acumulado retenido (N}^\circ 4, N^\circ 8, N^\circ 16, N^\circ 30, N^\circ 50, N^\circ 100)}{100}$$

Donde:

MF=Modulo de Finura

Contenido de Humedad. El contenido de humedad en proporción al peso seco es un parámetro importante tanto en el diseño de mezclas de CAC como en su elaboración, el contenido de humedad de la arena influye significativamente en el comportamiento de la mezcla en estado fresco por lo que debe monitorearse constantemente su valor

Normativa. “NTP 339.185: AGREGADOS. Métodos de ensayo normalizado para contenido de humedad total evaporable de agregados por secado”

Equipos. Balanza con precisión al 0.1% de la muestra a ensayar, recipiente para almacenar la muestra resistente al calor y un horno con temperatura de 110°C.

Muestra.

- *Agregado grueso:* La masa de la muestra utilizada será de acuerdo a la siguiente tabla

Tabla 18

Tamaño mínimo de la muestra del agregado grueso para el contenido de humedad

Tamaño de muestra de agregado		Tamaño de la muestra de agregado
(mm)	(pulg)	(kg)
4.75	(Nro 4)	0.5
9.5	3/8	1.5
12.5	1/2	2
19	3/4	3
25	1	4

Nota. La tabla especifica el tamaño mínimo de la muestra de agregado para el tamaño máximo nominal de 19mm. Fuente: (NTP 339.185, 2002)

- *Agregado fino:* En la muestra a evaluar se toma en cuenta la siguiente tabla basándose en la norma NTP 339.185, por tanto, la muestra mínima es de 0.5kg.

Tabla 19

Tamaño de la muestra mínima para el ensayo

Tamaño máximo nominal del agregado en mm (pulg)	Masa mínima de la muestra de agregado en kg
4.75 (0.187)	0.5

Nota. Fuente:(NTP 339.185, 2002)

Procedimiento en Laboratorio. Medir la masa de los recipientes y de las muestras a ensayar, mediante un elemento que brinde altas temperaturas considerando que no se debe evitar pérdida de material secar la muestra, generalmente se emplea un horno, una vez que la muestra provoque o pueda provocar una variación de menos de 0.1% de la cantidad de masa de la muestra ensayada y calcular la masa de la muestra tras el secado y alcance temperatura ambiente con una aproximación de 0.1%. (NTP 339.185,2002)

Figura 16

Peso de las muestras para el contenido de humedad del agregado grueso y fino



Nota. Fuente: Elaboración Propia

Cálculos. Para el cálculo de los resultados se utilizará la siguiente expresión.

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

Donde:

P=Contenido total de humedad evaporable de la muestra (%)

W=Masa de la muestra húmeda original (gr)

D=Masa de la muestra seca (gr)

Pasante de la Malla N°200. Los finos pasantes de la malla 200 tienen estrechez con la elaboración de un concreto autocompactante ya que junto con el volumen de cemento ayudan a crear un mortero con una gran cohesión y estabilidad, evitando de esta forma la segregación en el concreto. (ACI 237R-07, 2007)

Normativa. “NTP 400.018: AGREGADOS. Métodos de ensayo normalizado para determinar materiales más finos que pasan por el tamiz normalizado 75 µm (N°200) por lavado en agregados”

Equipos. Tamiz N°200, agua, balanza sensible al 0.1% de la muestra a ensayar, recipiente para almacenar la muestra resistente al calor y capaz de retener el agregado al momento de realizar su lavado y un horno con temperatura de 110°C.

Muestra. Se prepara la muestra cuarteándola y reduciéndola de acuerdo a la NTP 400.043, y de acuerdo con la granulometría que presente el agregado se determinara la cantidad mínima de muestra a ensayar, una vez con la muestra debe combinarse y secarse en un horno. (NTP 400.018, 2013)

Tabla 20

Cantidad mínima de muestra

Tamaño Máximo Nominal del Agregado	Cantidad Mínima (gr)
4,75mm (N°4) o menos	300

Entre 4,75mm (N°4) y 9.5mm (3/8")	1000
Entre 4,75mm (N°4) y 19mm (3/4")	2500
Mayor a 19mm (3/4")	5000

Nota. Fuente: (NTP 400.018, 2013)

Procedimiento. Secar la Muestra a ensayar en un horno a 110°C, se seca y se calcula la masa a ensayar, con la ayuda de un recipiente se debe sumergir en agua, luego sacudir el recipiente con la muestra para dividir los finos en la muestra (malla N°200) , seguir sacudiendo constantemente, vaciar el agua superficial de lavado encima de los tamices sin decantar el material grueso de la muestra, volver a repetir el paso anterior hasta que el agua que se vacíe esté clara y devolver el material que haya sido retenido en las mallas mediante un chorro agua y tratando de evitar la pérdida de material, secar toda la muestra en un horno a temperatura de 110°C y registrar la masa.

Figura 17

Lavado del material fino que pasa la malla 200 del agregado grueso de Vicho



Nota. Fuente: Elaboración Propia

Cálculos. El material que pasa la malla N° 200 se calculara de la siguiente manera:

$$A = \frac{100(P_1 - P_2)}{P_1}$$

Teniendo en cuenta que:

A : Porcentaje de material fino que logra pasar por la malla N°200 por lavado

P_1 : Masa seca previo al lavado (gr)

P_2 : Masa seca posterior al lavado (gr)

Peso Específico y Absorción. El Peso específico o también conocido como gravedad específica es una propiedad importante en el diseño de mezclas de concreto autocompactante ya que relaciona el peso y el volumen de los agregados, dos parámetros que se requieren al momento de diseñar un CAC ya que permite determinar la cantidad de pasta a emplearse (González Morán et al., 2005)

Normativa.

- *Agregado grueso*: “NTP 400.021: AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para la densidad, la densidad relativa (peso específico) y absorción del agregado grueso”
- *Agregado fino*: “NTP 400.022: AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para la densidad, la densidad relativa (peso específico) y absorción del agregado fino”

Equipos.

Para el agregado grueso: Balanza con una precisión de 0.05% del peso a ensayar, deberá ser anclada a un aparato con las condiciones de sumergir el agregado grueso dentro del recipiente agua, recipiente para medir el peso aparente, generalmente una canastilla de metal o alambre con capacidad suficiente para la muestra a sumergir, debe evitar la retención del aire, recipiente para sumergir el agregado, tamiz N°4, franela y un horno que mantenga la temperatura a 110°C

Para el agregado fino: Balanza con precisión de 0.1gr de la masa a ensayar y con capacidad mínima de 1kg, picnómetro de vidrio con una marca de calibración donde el volumen

del picnómetro hasta la marca sea como mínimo 50% mayor al volumen requerido para ordenar la muestra de ensayo, molde metálico en forma de tronco truncado con diámetros de 40 y 90mm y una altura de 75mm y espesor mínimo de 0.8mm, barra compactadora metálica de 340gr de masa y un diámetro de 25mm, bomba de vacíos (opcional) para la extracción del aire retenido, horno que mantenga la temperatura a 110°C, franela y una escobilla.

Muestra.

Para el agregado grueso: La NTP 400.021 establece que no se considerara todo el material que pase la malla N° 4, se lavara el agregado grueso para esto y se tamizara. Por ende, se tiene que la masa a ensayar será de 2kg como mínimo.

Tabla 21

Masa mínima de ensayo del peso específico del agregado grueso

Tamaño Máximo Nominal del Agregado Grueso mm (pulg.)	Cantidad de Masa Mínima para el ensayo (kg)
12,5 (1/2) o menor	2
19,0 (3/4)	3
25,0 (1)	4

Nota. Fuente:(NTP 400.021, 2013)

Figura 18

Muestra de agregado grueso sumergida durante 24 horas



Nota. Fuente: Elaboración Propia

Para el agregado fino: La muestra a ensayar primeramente deberá estar seca en el horno, luego de un tiempo que reduzca su temperatura se sumerge dentro de agua y se deja descansar por un lapso de 24 horas, se procede a decantar el sobrante de agua con cuidado de la pérdida de agregado, se buscará en la muestra la condición de saturada superficialmente seca para lo cual se dejará secar al aire libre, mediante un recipiente metálico con forma de cono se realizará la prueba de humedad superficial introduciendo el agregado fino dentro hasta exceder la capacidad del cono, posteriormente se procede a compactar mediante una varilla con 25 golpes a lo largo de la superficie, la muestra en la base del cono se desprende y se procede a desprender el cono. En caso de que la muestra no cumpla con la condición de saturada superficialmente seca la muestra conservara su silueta, en caso de que no se producirá un pequeño desprendimiento del material y estará listo para emplearse en la prueba. (NTP 400.022, 2013)

Figura 19

Preparación de la muestra de agregado fino ensayo de peso específico



Nota. Fuente: Elaboración Propia

Procedimiento.

Para el agregado grueso: se deberá secar la muestra a ensayar posteriormente a su lavado, sumergir el agregado a trabajar durante 24 horas, quitar la muestra del agua y posteriormente colocar sobre un material absorbente, como una franela, frotar la muestra en la

franela hasta que no queden las partículas visibles de agua, debe considerarse que no debe existir una pérdida de humedad por evaporación del agua dentro de los poros del agregado ya que esta es la condición de saturada superficialmente seca, registrar la masa, posteriormente se debe sumergir la muestra saturada superficialmente seca dentro de un recipiente para determinar la masa aparente sumergida a una temperatura del agua de 23°C y por último se extrae la muestra del recipiente y se seca en el horno y registrar la masa seca.

Figura 20

Ensayo de peso específico del agregado grueso de Vicho



Nota. Fuente: Elaboración Propia

Para el agregado fino: Registrar el peso del picnómetro con agua llenada hasta la marca de calibración de este, esta prueba se realizó mediante el procedimiento gravimétrico para lo cual se introduce agua en el picnómetro, dentro del picnómetro con agua se coloca 500gr de la muestra en condición de saturada superficialmente seca y también se coloca agua hasta alcanzar el 90% de la capacidad del picnómetro, se procede a revolver y rodar el picnómetro de forma manual o con la ayuda de un extractor de vacíos con el fin de quitar el aire dentro de la muestra sumergida en el picnómetro, una vez eliminado el aire dentro del picnómetro, se vacía el agua hasta alcanzar la marca de calibración del picnómetro. Determinar la masa total del picnómetro, la muestra y el agua, extraer la muestra del picnómetro a un recipiente, decantar con cuidado de pérdida de material y hacer secar al horno, posteriormente determinar la masa de la muestra.

Figura 21

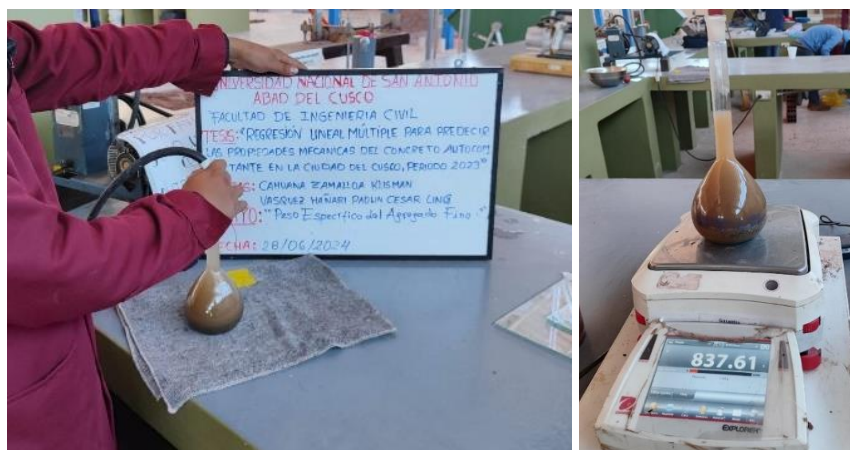
Masa del picnómetro hasta la marca de calibración e introducción del agregado



Nota. Fuente: Elaboración Propia

Figura 22

Empleo de una máquina de vacíos para extraer el aire y medición de masa



Nota. Fuente: Elaboración Propia

Cálculos.

Agregado Grueso.

A: Cantidad de masa de la muestra seca en el horno (gr)

B: Cantidad de masa de la muestra a ensayar en condición de saturada superficialmente seca (gr)

C: Cantidad de masa aparente de la muestra sumergida en agua (gr)

Mediante las siguientes formulas se encontrarán los valores buscados en este ensayo:

$$\text{Gravedad Especifica o Densidad Relativa (OD)} = \frac{A}{B - C}$$

$$\text{Gravedad Especifica o Densidad Relativa (SSD)} = \frac{B}{B - C}$$

$$\text{Densidad Relativa Aparente (Gravedad Específica aparente)} = \frac{A}{A - C}$$

$$\text{Densidad (OD)} \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \frac{997.5A}{B - C}$$

$$\text{Densidad (SSD)} \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \frac{997.5B}{B - C}$$

$$\text{Densidad Aparente} \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \frac{997.5A}{A - C}$$

$$\text{Absorción (\%)} = \frac{100 (B - A)}{A}$$

Agregado Fino.

A: Cantidad de masa de la muestra secada en el horno (gr)

B: Cantidad de masa del picnómetro llenado con agua hasta la marca de calibración (gr)

C: Cantidad de masa del picnómetro llenado con la muestra y agua hasta la marca de calibración (gr)

S: Cantidad de masa saturada superficialmente seca utilizado en el ensayo (gr)

Para lo cual se emplean las siguientes formulas:

$$\text{Gravedad Especifica (OD)} = \frac{A}{B + S - C}$$

$$\text{Gravedad Especifica (SSD)} = \frac{S}{B + S - C}$$

$$\text{Gravedad Especifica Aparente} = \frac{A}{B + A - C}$$

$$\text{Densidad(OD)} \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \frac{997.5A}{B + S - C}$$

$$\text{Densidad(SSD)} \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \frac{997.5S}{B + S - C}$$

$$\text{Densidad Aparente} \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \frac{997.5A}{B + A - C}$$

$$\text{Absorción (\%)} = \frac{100 (S - A)}{A}$$

Peso Unitario Suelto. En el empleo de los concretos autocompactantes no se requieren métodos de vibrado y compactación como el caso del concreto convencional, por lo que ha de emplearse en el diseño de mezclas el valor del peso unitario suelto ya que la disposición del esqueleto granular en la pasta depende solamente de la fuerza de gravedad. (González Morán et al., 2005)

Normativa. NTP 400.017: AGREGADOS. Método de ensayo para determinar el peso unitario del agregado.

Equipos. Balanza con precisión al 0.1% de la muestra a ensayar, varilla compactadora de acero liso con un diámetro de 5/8" y una longitud de 60cm, recipiente metálico cilíndrico y orejas para mover el recipiente y con un volumen definido y una altura aproximadamente igual al diámetro del recipiente y un cucharón metálico

Muestra. La norma NTP 400.017 establece que la masa a ensayar debe ser de aproximadamente 125 a 200% de material que cubra el envase.

Procedimiento. Determinar el peso y volumen del recipiente vacío, para determinar el peso unitario suelto del agregado se procede a cubrir el envase seleccionado para la prueba, introduciendo desde una altitud que no supere los 50cm del envase a trabajar., nivelar el margen superior del recipiente con una varilla lisa compactadora, mediante una balanza, pesar y registrar.

Figura 23

Peso unitario suelto del agregado grueso y fino



Nota. Fuente: Elaboración Propia

Cálculos. La norma establece que se determina la densidad de masa o peso unitario suelto de la siguiente manera:

$$M = \frac{G - T}{V}$$

Teniendo que:

M : Peso Unitario Suelto del Agregado (kg/m³)

G : Cantidad de Masa del Agregado y del Recipiente (kg)

T: Cantidad de Masa del Recipiente (kg)

V: Volumen del Recipiente (m³)

Peso Unitario Compactado. La norma (ACI 237R-07, 2007) en su apartado de diseño de mezclas establece como una forma de partida para realizar los primeros ensayos de autocompactabilidad este parámetro como un 50% del total del volumen de concreto.

Normativa. NTP 400.017: AGREGADOS. Método de ensayo para determinar el peso unitario del agregado.

Equipos. Balanza con precisión al 0.1% de la muestra a ensayar, varilla compactadora de acero liso con un diámetro de 5/8" y una longitud de 60cm, recipiente metálico cilíndrico y orejas para mover el recipiente y con un volumen definido y una altura aproximadamente igual al diámetro del recipiente y un cucharón metálico

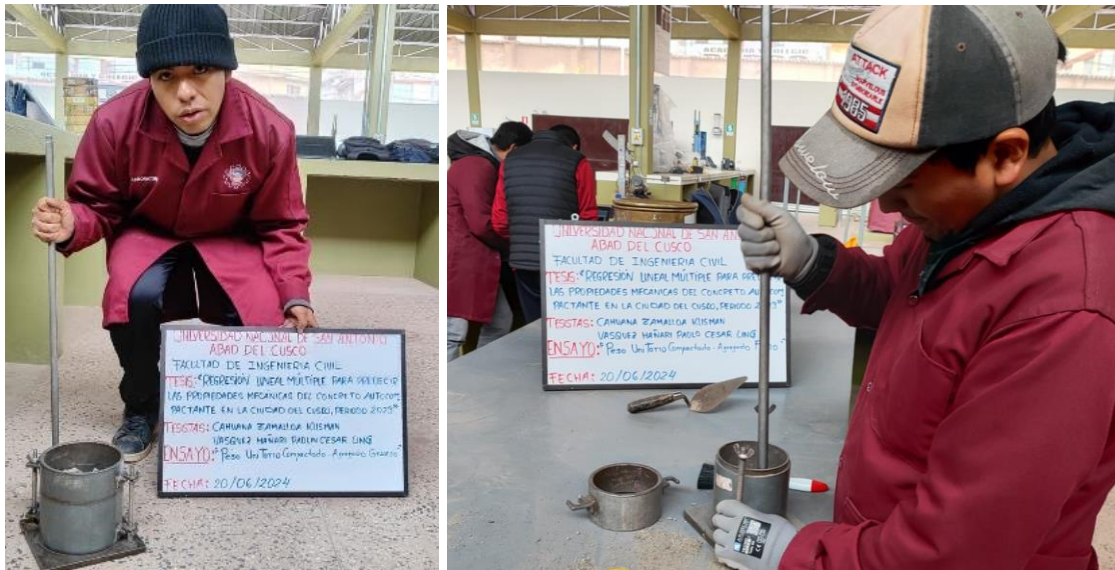
Muestra. La muestra utilizada debe estar seca en un horno y que la cantidad necesaria debe ser 125% a 200% del volumen del recipiente.

Procedimiento. Llenar el recipiente en tres capas del recipiente, apisonar en cada capa con 25 golpes, enrazar y medir la masa del recipiente más el agregado grueso

El procedimiento realizado para calcular el calcular el peso unitario suelto fue de acuerdo a la NTP 400.017.

Figura 24

Ensayo del peso unitario compactado del agregado grueso y agregado fino



Nota. Fuente: Elaboración Propia

Cálculos.

Densidad de masa

$$M = \frac{G - T}{V}$$

M=Densidad de masa del agregado (kg/m3)

G= Masa del agregado y recipiente (kg)

T= Masa del recipiente (kg)

V= Volumen del recipiente (m3)

Ensayo de Abrasión. Esta propiedad sirve principalmente para analizar el desgaste y abrasión al que se somete el agregado grueso en la producción de estructuras de concreto mediante el equipo de los Ángeles la cual representa estas condiciones.

Normativa. NTP 400.019: AGREGADOS. Métodos de ensayos normalizado para la determinación de la resistencia a la degradación en agregados gruesos de tamaños menores por abrasión e impacto en la máquina de los Ángeles”

Equipos. Máquina de los ángeles, tamices, balanza con exactitud igual a 0.1% del peso a emplearse en este ensayo, esferas de acero que serán empleadas como carga en el ensayo, con un diámetro de 47mm y una masa aproximada de entre 390 y 445gr, horno que tenga la capacidad de mantener la temperatura constante a 110°C.

Muestra. La cantidad de muestra ensayada según la norma NTP 400.019. En la norma se menciona que es aplicable para agregados grueso que posean un tamaño máximo nominal menores a 1 ½”.

Procedimiento. Se tendrá que lavar y secar la muestra en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$, preparar la muestra según la tabla de gradación de muestras del ensayo, lista la muestra se coloca dentro de la máquina de los ángeles, a una velocidad entre 30 rpm a 33 rpm hasta las 500 revoluciones, separar el material utilizando el tamiz N°12, luego lavar el material retenido en el tamiz.

Figura 25

Muestras pesadas según a la gradación B y preparación de la máquina de los ángeles



Nota. Fuente: Elaboración Propia

Figura 26

Ensayo de abrasión- equipo de abrasión los Angeles



Nota. Fuente: Elaboración Propia

Cálculos. El porcentaje de pérdida o desgaste es:

$$Desgaste = \frac{C - Y}{Y} * 100$$

Donde:

C: Masa inicial de la muestra del ensayo (gr)

Y: Masa final de la muestra del ensayo (gr)

Diseño de Mezclas del Concreto Autocompactante

Máxima Compacidad del Esqueleto Granular. Para el diseño de mezclas del concreto autocompactante se requiere determinar el porcentaje de vacíos en el esqueleto granular ya que este volumen será ocupado por la pasta, es por esto que se realizó este ensayo con el objetivo de encontrar el menor porcentaje de vacíos al mezclar diferentes proporciones de agregado grueso y fino del esqueleto granular sin embargo estas proporciones variarán en menor medida al ajustar las dosificaciones del concreto autocompactante.

Equipos. Balanza con precisión al 0.1% de la muestra a ensayar, varilla compactadora de acero liso con un diámetro de 5/8" y una longitud de 60cm, recipiente metálico cilíndrico y orejas para mover el recipiente y con un volumen definido y una altura aproximadamente igual al diámetro del recipiente y un cucharón metálico.

Muestra. Se debe considerar una masa como mínima de esqueleto granular de forma que llene y sobrepase el recipiente metálico a ensayar, puesto a que no existe una normativa tomaremos una muestra de 7kg del esqueleto granular, el peso de agregado grueso y fino variará para cada relación de grava/arena como muestra la tabla, esta muestra deberá estar previamente secada en el horno a una temperatura de 110°C.

Tabla 22

Masa de agregado grueso y fino considerando 7kg de esqueleto granular

Relación de Agregados		Masa para Realizar el Ensayo	
% Agregado Grueso	% Agregado Fino	Muestra de Agregado Grueso (kg)	Muestra de Agregado Fino (kg)
35	65	2.45	4.55
40	60	2.8	4.2
45	55	3.15	3.85
50	50	3.5	3.5
55	45	3.85	3.15

Nota. Fuente: Elaboración Propia

Procedimiento. Se sigue un procedimiento similar al establecido en la NTP 400.017, considerando una combinación de ambos agregados.

1. Determinar el peso y volumen del recipiente metálico vacío
2. Para determinar la máxima compacidad del esqueleto granular las proporciones de agregado grueso/fino se combinan sin compactar en un recipiente o sobre una superficie antes de colocar en el recipiente metálico.

3. Se procede a cubrir el envase metálico con las proporciones combinadas de agregados, introduciendo desde una altitud que no supere los 50cm del envase a trabajar.
4. Nivelar el margen superior del recipiente con una varilla lisa compactadora.
5. Mediante una balanza, pesar y registrar.

Figura 27

Muestras de agregado grueso y fino para realizar el ensayo y su combinación



Nota. Fuente: Elaboración Propia

Figura 28

Enrase con varilla del margen superior del recipiente y determinación del peso de la muestra



Nota. Fuente: Elaboración Propia

Cálculos. Se tiene:

A: Peso del molde donde se realiza el ensayo (*kg*)

V Volúmen del molde donde se realiza el ensayo (*m*³)

B: Peso del molde con la muestra para la combinación de grava/arena: 35/65% (*kg*)

C: Peso del molde con la muestra para la combinación de grava/arena: 40/60% (*kg*)

D: Peso del molde con la muestra para la combinación de grava/arena: 45/55% (*kg*)

E: Peso del molde con la muestra para la combinación de grava/arena: 50/50% (*kg*)

F: Peso del molde con la muestra para la combinación de grava/arena: 55/45% (*kg*)

G: Peso unitario compactado del agregado grueso (*kg/m*³)

H: Peso unitario compactado del agregado fino (*kg/m*³)

I: Gravedad específica del agregado grueso

J: Gravedad específica del agregado fino

Para lo cual se emplearán las siguientes fórmulas:

$$\text{Volúmen } AG_{35/65}(\%) = \frac{0.35(B - A)}{I} * \frac{100}{V}$$

$$\text{Volúmen } AG_{40/60}(\%) = \frac{0.40(C - A)}{I} * \frac{100}{V}$$

$$\text{Volúmen } AG_{45/55}(\%) = \frac{0.45(D - A)}{I} * \frac{100}{V}$$

$$\text{Volúmen } AG_{50/50}(\%) = \frac{0.50(E - A)}{I} * \frac{100}{V}$$

$$\text{Volúmen } AG_{55/45}(\%) = \frac{0.55(F - A)}{I} * \frac{100}{V}$$

$$\text{Volúmen } AF_{35/65}(\%) = \frac{0.65(B - A)}{J} * \frac{100}{V}$$

$$\text{Volúmen } AF_{40/60}(\%) = \frac{0.60(C - A)}{J} * \frac{100}{V}$$

$$\text{Volúmen } AF_{45/55}(\%) = \frac{0.55(D - A)}{J} * \frac{100}{V}$$

$$\text{Volúmen } AF_{50/50}(\%) = \frac{0.50(E - A)}{J} * \frac{100}{V}$$

$$\text{Volúmen } AF_{55/45}(\%) = \frac{0.45(F - A)}{J} * \frac{100}{V}$$

$$\text{Volúmen de vacíos}_{35/65} (\%) = 100 - \text{Volúmen } AG_{35/65}(\%) - \text{Volúmen } AF_{35/65}(\%)$$

$$\text{Volúmen de vacíos}_{40/60} (\%) = 100 - \text{Volúmen } AG_{40/60}(\%) - \text{Volúmen } AF_{40/60}(\%)$$

$$\text{Volúmen de vacíos}_{45/55} (\%) = 100 - \text{Volúmen } AG_{45/55}(\%) - \text{Volúmen } AF_{45/55}(\%)$$

$$\text{Volúmen de vacíos}_{50/50} (\%) = 100 - \text{Volúmen } AG_{50/50}(\%) - \text{Volúmen } AF_{50/50}(\%)$$

$$\text{Volúmen de vacíos}_{55/45} (\%) = 100 - \text{Volúmen } AG_{55/45}(\%) - \text{Volúmen } AF_{55/45}(\%)$$

Desarrollo del Diseño de Mezclas del Concreto Autocompactante. El diseño del concreto autocompactante se realizó según los lineamientos y recomendaciones que presenta la norma ACI 237R-07 además de la revisión de la literatura sobre procedimientos y métodos de diseño del concreto autocompactante. Se realizaron una serie de ensayos de autocompactación a las mezclas las cuales son la capacidad de paso, capacidad de relleno y resistencia a la segregación, hasta lograr que estos resultados se encuentran dentro de los rangos establecidos en las directrices de la norma ACI 237R-07 y la EFNARC.

El procedimiento que se siguió para el diseño de mezcla fue como se detalla a continuación (se desarrollara el procedimiento de diseño para la mezcla con un contenido de cemento de 470 kg/m³).

Selección del Flujo de Asentamiento. La tabla adaptada del ACI 237R-07 proporciona y presenta el tipo de asentamiento que debe tener la mezcla para ciertos elementos estructurales. Teniendo en cuenta que las Áreas sombreadas deberían ser evitadas.

En esta investigación se realizó el diseño para distintos asentamientos de flujo con el objetivo de observar la resistencia mecánica que adquiere el concreto autocompactante a los 28 días.

Figura 29

Tipo de asentamiento de la mezcla de CAC en base a los requerimientos estructurales

Características de los Elementos		Flujo de Asentamiento (Slump Flow)		
		< 550 mm	550 a 650 mm	> 650 mm
Nivel de Reforzamiento	Bajo			
	Medio			
	Alto			
Forma del elemento	Bajo			
	Medio			
	Alto			
Profundidad del elemento	Bajo			
	Medio			
	Alto			
Importancia del Acabado Superficial	Bajo			
	Medio			
	Alto			
Luz del Elemento	Bajo			
	Medio			
	Alto			
Grosor del Elemento	Bajo			
	Medio			
	Alto			
Contenido de Agregado Grueso	Bajo			
	Medio			
	Alto			
	Bajo			

Energía de Colocación	Medio			
	Alto			

Nota. Fuente: (ACI 237R-07, 2007)

Según la tabla se propone diseñar un concreto autocompactante que tenga un asentamiento mayor a 650mm.

Selección del Contenido de Cemento. La tabla adaptada del ACI 237R-07 proporciona las recomendaciones de la cantidad de cemento requerido por m³ para los tres tipos de asentamiento.

Tabla 23

Contenido de cemento requerido para determinados flujos de asentamiento

	Asentamiento < 550 mm	Asentamiento 550-650 mm	Asentamiento > 650mm
Contenido de cemento (kg/m ³)	355-385	385-445	>458

Nota. Adaptado de “Self-Consolidating Concrete” (ACI 237R-07,2007)

Como se pretende tener un flujo de asentamiento de 650 mm o más se requiere una cantidad de cemento como indica la tabla 23 igual o superior a 458 kg/m³, por lo tanto, se optó por un contenido de cemento de 470 kg/m³ y realizar la primera mezcla de prueba.

Selección del Tamaño Máximo Nominal del Agregado Grueso. Para este tipo de concreto la ACI 237R-07 y los diferentes antecedentes internacionales de diseño de concreto autocompactante sugieren un tamaño máximo menor a 20mm por lo que el agregado utilizado tiene un tamaño máximo 3/4” (19mm) con un tamaño máximo nominal de 1/2”.

Selección del Contenido de Aire Atrapado. El aire atrapado se determinó según la tabla del ACI 211.1-91

Tabla 24*Cantidad de aire aproximado en la mezcla*

Agua en kg/m³ para el tamaño nominal máximo indicado								
Asentamiento mm	9.5 mm	12.5 mm	19 mm	25 mm	38 mm	50 mm	75 mm	150 mm
Concreto sin entrada de aire								
25 a 50	207	199	190	179	166	154	130	113
75 a 100	228	216	205	193	181	169	145	124
150 a 175	243	228	216	202	190	178	160	-
Cantidad aproximada de aire en la mezcla (%)	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
Concreto con aire incluido								
25 a 50	181	175	168	160	150	142	122	107
75 a 100	202	193	184	175	165	157	133	124
150 a 175	216	205	197	184	174	166	154	-
	-	-	-	-	-	-	-	-
Exposición leve	4.5	4	3.5	3	2.5	2	1.5	1
Exposición moderada	6	5.5	5	4.5	4.5	4	3.5	3
Exposición severa	7.5	7	6	6	5.5	5	4.5	4

Nota. Fuente: (ACI 211.1-91,1997)

En este caso el aire atrapado asumido es de 2.5% para un tamaño máximo nominal de ½” que posee el agregado utilizado en la mezcla.

Determinación del contenido de Agregado Grueso y Agregado Fino (Esqueleto granular). Para la determinación del contenido de agregado grueso y agregado fino se hará mediante los parámetros brindados por la norma ACI 237R-07 como se muestra en la tabla 25 y de los parámetros de diseño de los antecedentes internacionales.

Tabla 25*Proporcionamiento de los parámetros de mezcla*

Volumen absoluto de agregado grueso	28 a 32 % (TMN>12mm)
Fracción de pasta (calculada en volumen)	34 a 40 % (Volumen total de mezcla)
Fracción de mortero	68 a 72 % (Volumen total de mezcla)

Nota. Adaptado de “Self-Consolidating Concrete” (ACI 237R-07,2007)

Tabla 26*Requerimientos generales de volumen para la mezcla del concreto autocompactante*

Volumen del agregado grueso	30 a 34 % (volumen del hormigón)
Volumen de agregado fino	40 a 50 % (volumen de mortero)

Nota. Recopilado de parámetros de diseño basados en antecedentes internacionales

Se tomaron valores entre los rangos y parámetros en dichas tablas para la evaluación de autocompactación del concreto, además se debe tener en cuenta que esta dosificación no es la definitiva, ya que estará sujeta a diferentes variables como la calidad del aditivo a utilizar, la humedad contenida en los agregados, etc. las cuales darán lugar a un reajuste en su condición definitiva.

Para hallar el contenido de agregado grueso (en peso) se requiere tener como datos de entrada el peso unitario suelto del agregado grueso, peso específico del agregado grueso y definir el porcentaje de agregado en su peso unitario suelto.

Peso específico	2661.7 kg/m ³
Peso unitario suelto de agregado grueso	1414.47 kg/m ³
% de agregado grueso en el peso unitario	55.3 %

$$\text{Peso del agregado grueso} = 1414.47 \times \frac{55.3}{100} = 781.88 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Volumen del agregado grueso} = \frac{781.88}{2661.7} = 0.2928 \text{ m}^3$$

Se tiene un volumen de 0.2928 m³ que representa el 29.28 % del volumen total del concreto.

Seguidamente se halla el contenido de mortero

$$\text{Volumen de mortero} = \text{Volumen total} - \text{volumen de agregado grueso}$$

$$Volumen\ de\ mortero = 1 - 0.2928 = 0.7072\ m^3$$

Definimos el porcentaje de arena que debe estar presente en el mortero.

% de arena en el mortero	43.2 %
Peso específico de la arena	2589.37 kg/m ³

$$Volumen\ de\ arena = \frac{43.2}{100} \times 0.7072 = 0.3055\ m^3$$

$$Peso\ de\ la\ arena = 0.3055 \times 2589.37 = 794.28\ kg/m^3$$

Calculamos el contenido de pasta

$$Volumen\ de\ pasta = Volumen\ de\ mortero - Volumen\ de\ arena$$

$$Volumen\ de\ pasta = 0.7072 - 0.3055 = 0.4017\ m^3$$

Selección de la Relación Agua/Cemento y Dosis de Superplastificante. Para la selección de la relación agua/cemento y la dosis requerida de superplastificante se optará por la más adecuada.

En el caso de que el asentamiento de la mezcla no es el del diseño, entonces se deberá cambiar la cantidad de aditivo en el rango que sugiere la ficha técnica del producto.

Se verifica el diseño de la mezcla, bajo los estándares y lineamientos de la federación europea (EFNARC).

En esta sección definimos la relación agua/cemento y hallamos la composición de la pasta teniendo los siguientes datos de entrada.

Cabe señalar que para definir el porcentaje de aditivo superplastificante se realizó ensayos previos al mortero (v-funnel y slump).

Gravedad específica del cemento	2.75
---------------------------------	------

Contenido de aire	2.5 %
Contenido de cemento	470 kg/m ³
Relación agua/cemento (peso)	0.43
Densidad del Aditivo superplastificante	1.11 kg/lts
% de superplastificante	0.83 %

Calculamos la composición de la pasta

$$Volumen\ de\ agua = R(a/c) \times 470 = 0.43 \times 470 = 202.10\ lts/m^3$$

$$Volumen\ de\ cemento = \frac{470}{2.75} = 170.91\ lts/m^3$$

$$Volumen\ de\ superplastificante = \frac{0.83}{100} \times \frac{470}{1.11} = 3.514\ lts/m^3$$

$$Volumen\ aire = 2.5\% = 25\ lts/m^3$$

Calculamos el volumen total de la pasta.

$$Volumen\ de\ pasta = 202.30 + 170.91 + 3.514 + 25 = 401.52\ lts/m^3$$

Finalmente tenemos las proporciones de los componentes de la mezcla.

Tipo de mezcla	Cemento (kg/m ³)	Agua (lts/m ³)	Agregado grueso (kg/m ³)	Agregado fino (kg/m ³)	SP (kg/m ³)
1	470.00	202.10	781.88	794.28	3.90

Tipo de mezcla	Cemento (kg/m ³)	Agua (lts/m ³)	Esqueleto granular (kg/m ³)	SP (kg/m ³)
1	470.00	202.10	1576.16	3.90

Corrección de los Valores de Diseño por Humedad y Absorción del Agregado. Se realizó la corrección de humedad de los agregados debido a la humedad que se contenía en el recipiente y lugar de almacenamiento, estas correcciones al diseño se realizaron un día antes del vaciado de cada mezcla, para ello se realizó la corrección de la siguiente manera.

- Corrección por humedad.

$$\text{Peso ajustado} = \text{Peso seco agregado(fino o grueso)} \times \left(1 + \frac{\% \text{ de humedad}}{100}\right)$$

Calculamos los pesos ajustados del agregado grueso y fino

$$\text{Peso ajustado grueso} = 781.88 \times \left(1 + \frac{0.5}{100}\right) = 785.79 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Peso ajustado fino} = 794.28 \times \left(1 + \frac{1.32}{100}\right) = 804.77 \text{ kg/m}^3$$

– Corrección por absorción.

$$\text{Aporte agua} = \text{Peso seco(fino o grueso)} \times \left(\frac{\% \text{ de humedad} - \% \text{ de Absorción}}{100}\right)$$

Calculamos el aporte de agua del agregado grueso y fino.

$$\text{Aporte agua (grueso)} = 781.88 \times \left(\frac{0.5 - 2.04}{100}\right) = -12.04 \text{ lts/m}^3$$

$$\text{Aporte agua (fino)} = 794.28 \times \left(\frac{1.32 - 1.93}{100}\right) = -4.85 \text{ lts/m}^3$$

El contenido de agua ajustada se realiza de la siguiente manera:

$$\text{Agua ajustada} = \text{Agua inicial} - \text{Aporte de agua(grueso)} - \text{Aporte de agua (fino)}$$

Calculamos el aporte de agua total de agua al diseño.

$$\text{Agua ajustada} = 202.10 - (-12.04) - (-4.85) = 215.47 \text{ lts/m}^3$$

Determinación de la Proporción del Diseño.

Tipo de mezcla	Cemento (kg/m³)	Agua (lts/m³)	Agregado grueso (kg/m³)	Agregado fino (kg/m³)	SP (kg/m³)
1	470.00	215.47	785.79	804.77	3.90

Tipo de mezcla	Cemento (kg/m3)	Agua (lts/m3)	Esqueleto granular (kg/m3)	SP (kg/m3)
1	470.00	215.47	1590.56	3.90

Luego de realizadas las correcciones y establecido las proporciones de los componentes de la mezcla de prueba se procede a realizar la verificación del diseño, bajo los estándares y lineamientos de la federación europea (EFNARC) y la norma ACI 237R-07, en caso no cumpla se realizarán los ajustes necesarios al diseño en el laboratorio, estos reajustes pueden ser la modificación de la cantidad de aditivo, modificar la proporción de agregado grueso o fino (esqueleto granular), contenido de cemento (pasta) o la modificación de la relación agua/cemento.

Diseño de Concreto Autocompactante (Contenido de Cemento de 470kg/m3).

A Información Previa			
Asentamiento	> 650	mm	
Contenido de cemento	> 458	kg/m3	
B Cálculo del contenido de agregado grueso en el volumen total			
Peso específico	2.67	2661.7	kg/m3
Peso unitario de agregado grueso	1414.47	kg/m3	
% de agregado grueso en el peso unitario	55.3		
Peso de agregado grueso	781.8817	kg/m3	
Volumen de agregado grueso	292.8396	lts/m3	
	29.28%		
C Cálculo del volumen de mortero			
	volumen total - volumen de árido grueso		
Volumen de mortero	707.1604	lts/m3	
D Cálculo de volumen de arena			
% de arena en el volumen de mortero	43.2	%	
Volumen de arena	305.4933	lts/m3	
E Cálculo del volumen de pasta			
	Volumen de mortero - Volumen de arena		

Volumen de pasta	401.67	lts/m3
------------------	--------	--------

F Cálculo de la composición de la pasta		
Gravedad específica del cemento	2.75	
Contenido de aire	2.5	%
	25	lts/m3
Densidad del superplastificante	1.11	kg/lts
Relación de agua/cemento (en peso)	0.43	
% de Superplastificante	0.83	%
cemento	470	kg/m3
Cemento	470	kg/m3
Agua	202.1	lts/m3
Volumen de cemento	170.909	lts/m3
Superplastificante	3.901	kg/m3
	3.514	lts/m3
Volumen total de la pasta	401.52	lts/m3

Proporciones de los materiales		
Cemento	470	kg/m3
Contenido inicial de agua	202.1	lts/m3
Agregado Grueso	781.8817	kg/m3
Agregado Fino	794.2826	kg/m3

G Cálculo de materiales constituyentes del concreto		
Datos de los materiales		
Peso específico de la arena	2.59	
% de absorción del agregado grueso	2.04	%
% de absorción del agregado fino	1.93	%
% Humedad del agregado grueso	0.50	%
% Humedad del agregado fino	1.32	%

H Corrección por humedad y absorción		
1. Contenido de agua corregida=Agua inicial - Agregado grueso*(% de humedad - % de absorción) - Agregado fino*(% de humedad - % de absorción)		
Contenido de Agua corregido	215.4717	lts/m3
2. Peso de agregado grueso ajustado=Agregado grueso*(1+(% de humedad))		
Peso de agregado grueso corregido	785.7911	kg/m3
3. Peso de arena corregida=Agregado fino*(1+(% de humedad))		

Peso de arena corregido	804.7671 kg/m ³
-------------------------	----------------------------

I PROPORCIONES DE LA MEZCLA		
Cemento	470.00	kg/m ³
Agua	215.47	lts/m ³
Agregado Grueso	785.79	kg/m ³
Agregado Fino	804.77	kg/m ³
Superplastificante	3.90	kg/m ³

Ensayos para Determinar las Propiedades de Autocompactabilidad del Concreto Autocompactante

Pruebas de Fluidéz del Mortero. Tras diseñar las mezclas preliminares del concreto autocompactante se tiene que evaluar en previamente el mortero, ya que si posee una alta deformabilidad provee a la mezcla propiedades de autocompactación por acción de su propio peso, de manera que las estructuras hechas de concreto autocompactante no necesitan de vibración o compactación, se debe tomar en cuenta que una viscosidad moderada junto a la deformabilidad del mortero producen que la mezcla pueda fluir a través de obstáculos sin llegar a segregarse, es por eso que se desarrollaron dos ensayos para determinar empíricamente la deformabilidad y la viscosidad del mortero y ajustar las mezclas (Okamura & Ouchi, 2003)

Se requiere que el mortero presente las siguientes dos características:

- Suficiente deformabilidad
- Viscosidad moderada

Las cuales se determinan mediante los ensayos de mini Slump Flow y el ensayo de V-Funnel del mortero y si los resultados de alguno de los ensayos no se encuentran dentro de los requerimientos de viscosidad y deformabilidad se realiza el reajuste de la dosificación del superplastificante para posteriormente realizar las pruebas de autocompactabilidad del concreto autocompactante.

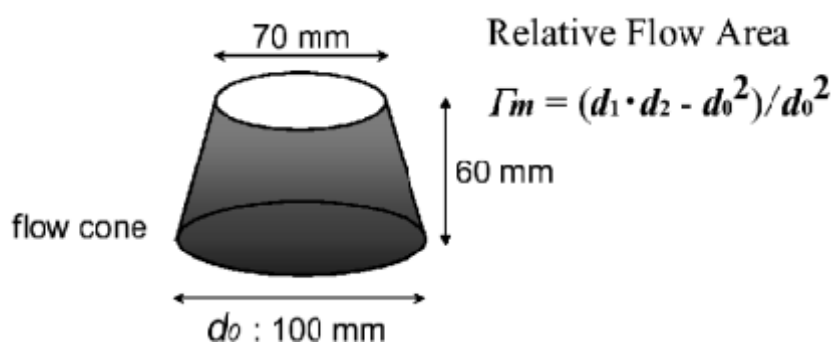
Mini Slump Flow. El ensayo de Mini Slump Flow sirve para encontrar la deformabilidad del mortero en una mezcla de concreto autocompactante. Una adecuada dosificación de aditivos proveerá al mortero de una deformabilidad alta para lo cual en cada diseño se evalúa el mini asentamiento (González et al., 2005).

Este ensayo se realizó en base a las pautas por parte de los investigadores Okamura y Ouchi y algunas sugerencias por parte de la EFNARC.

- Equipos. Acero con forma de cono truncado abierto en sus diámetros y estos sean de 70mm y 100mm y una altura de 60mm, recipiente metálico que no reaccione con el cemento, agua o aditivos para el mezclado, wincha o regla métrica, superficie homogénea, nivelada y no absorbente que sea de conveniencia de acero para realizar el ensayo, badilejo y petróleo, gasolina o cualquier otro material parecido

Figura 30

Cono de acero para el ensayo de mini slump



Nota. Fuente:(Okamura & Ouchi, 2003)

- Procedimiento: Tener una superficie horizontal, homogénea, nivelada, que no reaccione con el cemento y no absorbente; y un cono de acero truncado, humedecer con petróleo la superficie horizontal y el cono de acero, aplastar con fuerza el cono de manera que no exista desprendimiento del mortero por la base y llenar el cono con el mortero, enrasar la parte superior y limpiar la muestra que haya quedado

desprendida, en un solo acto desprender verticalmente el cono y dejar al mortero fluir a través de la superficie libremente y una vez que el mortero haya dejado de fluir medir los diámetros perpendiculares de los morteros.

Figura 31

Ensayo de mini slump flow del mortero



Nota. Fuente: Elaboración Propia

Figura 32

Desprendimiento del material sobrante y medición de diámetros del mortero



Nota. Fuente: Elaboración Propia

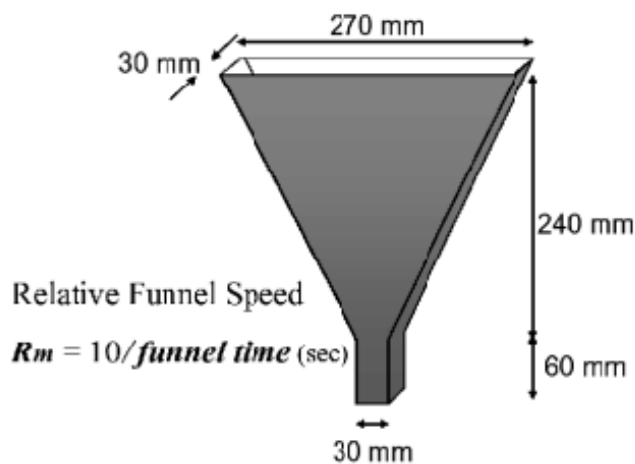
V-Funnel del Mortero. El ensayo de V-funnel del mortero sirve para encontrar la viscosidad del mortero en una mezcla de concreto autocompactante, se debe encontrar un valor adecuado a la dosificación de aditivo y de la relación agua/cemento para usar en la mezcla de concreto.

Este ensayo se realizó en base a las pautas por parte de los investigadores Okamura y Ouchi.

- Equipos: Material de acero con forma de embudo abierto y una compuerta para liberar el mortero cuyas dimensiones aproximadamente deben ser de 240mm de altura, una anchura de 270mm y una profundidad de 3mm y la sección de la boquilla debe ser de 30x30x60mm, recipiente metálico que no reaccione con el cemento, agua o aditivos para el mezclado, cronómetro, superficie homogénea, nivelada y no absorbente que sea de conveniencia de acero para realizar el ensayo, badilejo, petróleo, gasolina o cualquier otro material lubricante que no reaccione con el cemento.

Figura 33

Dimensiones del embudo pequeño



Nota. Fuente:(Okamura & Ouchi, 2003)

- Procedimiento: Se tiene un embudo pequeño en forma de “V” que cuente con una compuerta, se humedecerán todas las superficies internas del embudo así como la compuerta, debe cerrarse la compuerta del embudo y poner debajo un recipiente de forma que caiga el mortero sobre este al realizar el ensayo, se llena con mezcla en

un solo acto hasta el ras del embudo, se deja descansar la muestra por 10 segundos y se abre la compuerta y registrar el tiempo desde que se abre la compuerta hasta que se alcanza ver el fondo del embudo.

Figura 34

Llenado del Embudo en “V” para el mortero y abertura de la compuerta metálica



Nota. Fuente: Elaboración Propia

Pruebas de Autocompactabilidad del Concreto. Las principales características de un concreto autocompactante son las siguientes según la ACI 237R-07:

- Capacidad de llenado de la mezcla por acción de su propio peso
- Resistencia a la segregación
- Capacidad de paso a través de obstáculos como una congestión de armaduras de acero sin necesidad de una vibración o compactación externa

Es por ello que se tienen pruebas normadas y estandarizadas para que una mezcla cumpla con esas tres principales características y de este modo pueda considerarse como una mezcla de concreto autocompactante, en la siguiente tabla se resumen estos métodos a realizarse.(ACI 237R-07, 2007)

Tabla 27

Métodos de prueba para medir las características del concreto autocompactante

Nombre de la Prueba	Categoría	Característica	¿Qué mide la Prueba?
Slump - Flow	Flujo Libre	Capacidad de llenado	Distancia de flujo
Índice de Estabilidad Visual (VSI)	Condición Estática	Resistencia a la Segregación	Índice de Estabilidad Visual
T50	Flujo Libre	Capacidad de llenado	Tasa de Flujo
Caja en "L"	Flujo confinado	Capacidad de paso y capacidad de llenado	Distancia de flujo
Embudo en forma de "V"	Flujo confinado	Capacidad de llenado	Velocidad del flujo

Nota. Fuente:(ACI 237R-07, 2007)

Se realizarán las pruebas de Slump-flow, T50, VSI, caja en “L” y embudo en forma de “V” en las mezclas diseñadas para poder ajustarlas previo al vaciado de briquetas. Al ajustar las mezclas y encontrar valores óptimos se tendrán las mezclas de concreto autocompactante definitivas.

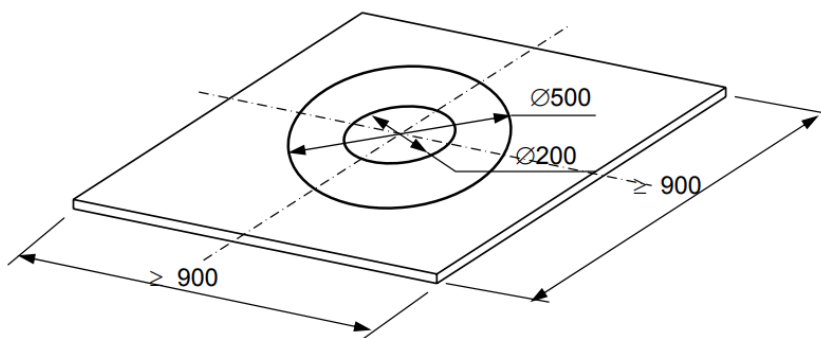
Slump Flow, Flujo de Asentamiento (T50) y VSI. La prueba de Slump Flow es un ensayo muy utilizado al momento de caracterizar al concreto autocompactante, mide la capacidad de fluir de la mezcla libre y horizontalmente sin la presencia de obstrucciones, el procedimiento está basado en la norma ASTM C 143 o en su equivalencia peruana NTP 339.035 pero con modificaciones al momento de determinar el asentamiento de la mezcla (ACI 237R-07, 2007)

Slump Flow es el diámetro promedio de dispersión de la mezcla de concreto autocompactante empleando para esto el cono de Abrahms invertido, sirve para ver el grado de fluidez y la viscosidad de la mezcla, se deberá realizar esta prueba en todas las mezclas de concreto autocompactante previa a su aprobación. (EFNARC et al., 2005)

- Normativa: El ensayo está basado en la norma ACI 237R-07: “Self-Consolidating Concrete” y la EFNARC: “The European Guidelines for Self-Compacting Concrete”
- Equipos: Superficie horizontal, nivelada con un área mínima de 900mm x 900mm y 2mm como mínimo de espesor sobre la cual se realizará el ensayo, esta superficie no debe reaccionar con el cemento ni deformarlo, deben trazarse dos círculos desde el centro de la superficie con 200 y 500mm de diámetro, regla o Wincha para medir, cronómetro, cono de Abrahms, petróleo, gasolina o cualquier otro material que no reaccione con el cemento, varilla metálica lisa.

Figura 35

Superficie horizontal para el ensayo de slump flow con dimensiones en mm



Nota. Fuente:(EFNARC et al., 2005)

- Procedimiento: Se debe humedecer una superficie horizontal, homogénea y nivelada de dimensiones mínimas 900x900mm, así como el interior del cono de Abrahms con petróleo, marcar sobre el centro de la placa un círculo de 500mm de diámetro, colocar el cono de Abrahms en forma invertida en el centro de la placa y mantenerlo en esa posición sujetando con fuerza o parándose sobre el de modo que no haya desprendimiento de material sobre la base del cono invertido, verter la mezcla de concreto autocompactante en una sola capa sobre el cono sin compactar de alguna forma, ni manual ni mecánica y evitar cualquier tipo de agitación, el material en el cono no debe descansar mas de 30 segundos, enrazar el material excedente con el empleo de

una varilla metálica y limpiar la superficie donde se realizó el ensayo quitando mezclas que se hayan desbordado, levantar el cono verticalmente en un solo acto sin interferir con el flujo de la mezcla y de esta manera la mezcla fluirá a través de la superficie de manera natural, simultáneamente a levantar el cono se debe encender el cronómetro y registrar el tiempo que tarda la mezcla en alcanzar al círculo de 500mm, este dato es tomado como T_{50} . Una vez que la mezcla no se desplace se deberán medir dos diámetros perpendiculares entre sí de la mezcla con una wincha, sin alterar de alguna manera la superficie o al concreto; el promedio de ambas mediciones se considerará como el flujo de asentamiento y por último evaluar visualmente la segregación y estimar el índice de estabilidad visual (VSI), puede haber pasta o mortero que se extienda más allá del agregado grueso formando un anillo o en la zona central también puede evidenciarse segregación del agregado grueso descartando de esta manera a la mezcla.

Tabla 28

Índice de estabilidad visual (VSI) del concreto autocompactante

Valor del VSI	Criterio
0 = Altamente Estable	No se tiene evidencia de segregación
1 = Estable	Sin un halo de mortero o pila de agregado
2 = Inestable	Un ligero halo de mortero (<10mm), pila de agregado o ambos
3 = Altamente Inestable	Segregación clara por un halo de mortero (>10mm), una pila de agregado o ambos

Nota. Fuente: (ACI 237R-07, 2007)

Figura 36

Nivelación horizontal de la superficie horizontal y llenado del cono de Abrahms con mezcla



Nota. Fuente: Elaboración Propia

Figura 37

Medición del flujo de asentamiento del concreto autocompactante



Nota. Fuente: Elaboración Propia

V-Funnel del Concreto. El ensayo de V-Funnel sirve para medir la viscosidad de la mezcla, este mide el tiempo de fluidez de la mezcla por acción de su propio peso, consiste en un embudo de acero en forma de V y debe contar con una estructura de soporte que lo fije al piso.

El ensayo “V” Funnel del concreto sirve para medir el grado de viscosidad por la tasa de flujo y de la capacidad de llenado de la mezcla mediante el flujo de la mezcla por acción de

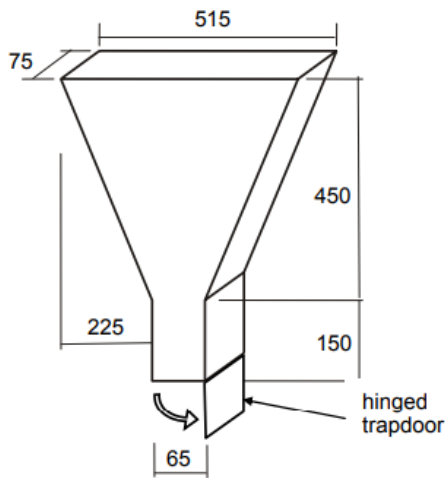
su propio peso. Una mezcla con baja viscosidad fluirá en un tiempo corto, presentando un flujo inicial rápido mientras que un concreto con alta viscosidad avanza progresivamente durante un tiempo relativamente prolongado. Este ensayo no se considera cuando el tamaño máximo del agregado grueso es mayor a 20mm (3/4") (EFNARC et al., 2005)

La consistencia del concreto o revenimiento puede mostrar una alta fluidez, plasticidad o un estado seco de la mezcla. En el mezclado pasa el tiempo y la mezcla puede llegar a alterarse, dado esa situación realizamos este ensayo que mediante una única prueba por mezcla hasta lograr el tiempo especificado.

- Normativa: El ensayo está basado en la norma ACI 237R-07: “Self-Consolidating Concrete” y la EFNARC: “The European Guidelines for Self-Compacting Concrete”
- Equipos: Embudo de acero en forma de “V” cuya anchura sea de 75mm y con una altura 600mm, su longitud debe ser de 515mm y su sección de salida sea de 65x75mm, todas las dimensiones deben tener una tolerancia de ± 1 mm, debe contar con una compuerta que abra y cierre e impida la salida del material, apoyada en un andamio para que no se tenga la necesidad de sujetar el embudo, las superficies deben ser lisas y no deben reaccionar con la pasta de cemento, un recipiente para contener la muestra, un cronómetro, petróleo, gasolina o cualquier otro material lubricante que no reaccione con el cemento

Figura 38

Embudo en “V” para el ensayo de V-Funnel del concreto con dimensiones en mm



Nota. Fuente:(EFNARC et al., 2005)

- Procedimiento: Este ensayo está basado en las indicaciones de la EFNARC: Se construye un embudo en forma de “V” de acero con sus dimensiones establecidas en la norma provista por la EFNARC la cual debe ser calibrada mecánicamente insitu empleando para ello un vernier lo cual nos permitirá obtener resultados fidedignos y comprobables, se coloca el embudo en “V” junto con su andamio sobre una superficie horizontal y nivelada, se humedecen con petróleo todas las superficies internas del embudo incluyendo su compuerta, se cierra la compuerta del embudo y se coloca en la parte inferior de este un recipiente para contener la mezcla, se llena con mezcla en un solo acto hasta el ras del embudo sin ninguna forma de compactación, se emplea un badilejo o una regla para enrasar, se deja descansar la mezcla por 10 segundos y después de ese tiempo se abre la compuerta y se debe registrar el tiempo desde que se abre la compuerta hasta que se alcance ver el fondo del embudo, registrar el tiempo de descarga T_v

Figura 39

Nivelación de la superficie horizontal para el inicio del ensayo V-Funnel



Nota. Fuente: Elaboración Propia

Figura 40

Enrasado de la mezcla en el embudo



Nota. Fuente: Elaboración Propia

Ensayo de L-Box. La prueba de la caja en “L” sirve para determinar la capacidad de paso de la mezcla, para ello se emplea una caja de acero la cual tiene forma de “L” y tiene dos secciones: una horizontal y otra vertical, separadas entre si por una compuerta metálica movable, se emplea 3 barras de refuerzo soldadas a la caja que simulan armaduras de acero en la sección horizontal.(ACI 237R-07, 2007)

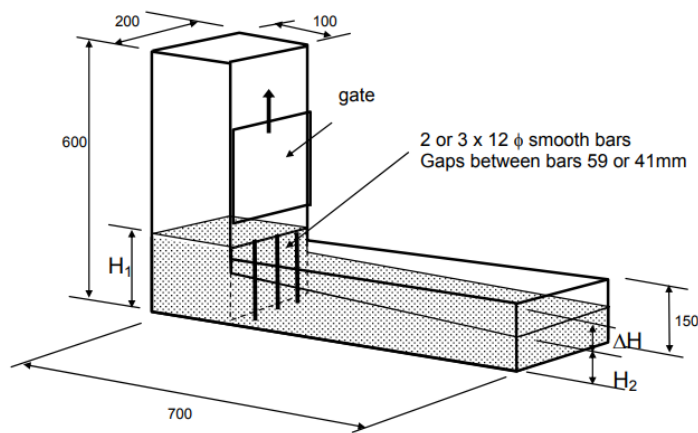
Depende en gran medida de la fluidez de la mezcla y del tamaño máximo del agregado grueso ya que si es muy elevado no fluirá a través de los obstáculos, generalmente se limita el tamaño máximo entre 12.5mm (1/2”) y 19mm (3/4”) (EFNARC et al., 2005)

Las varillas de acero son de 12mm y la distancia entre los refuerzos de la caja es el valor principal para establecer el tamaño máximo del agregado, la granulometría es demasiado importante en la capacidad de paso del CAC en secciones estrechas y reducidas. La prueba de tres barras de acero liso imita una alta congestión de acero.(EFNARC et al., 2005)

- Normativa: El ensayo está basado en la norma ACI 237R-07: “Self-Consolidating Concrete” y la EFNARC: “The European Guidelines for Self-Compacting Concrete”
- Equipos: Caja de acero en forma de “L” con superficies lisas que no reaccionen con el cemento y cuyas dimensiones están en la figura, esta caja debe contar con una compuerta que separe la sección vertical de la sección horizontal, con varillas de acero lisas a 70mm de esta compuerta soldadas de forma que simule armaduras; existen dos variaciones, en la que se consideran dos y tres barras, este último simula una densidad alta de armadura siendo de 12mm de diámetro. (EFNARC et al., 2005)
, regla, varilla metálica lisa y petróleo, gasolina o cualquier otro material que no reaccione con el cemento.

Figura 41

Caja en “L” con todas las dimensiones en mm



Nota. Fuente:(EFNARC et al., 2005)

- Procedimiento: Este ensayo está basado en las indicaciones de la EFNARC y del ACI 237R-07: Se construye una caja en forma de “L” de acero con sus dimensiones establecidas en la norma provista por la EFNARC la cual debe ser calibrada mecánicamente insitu empleando para ello un vernier lo cual nos permitirá obtener resultados fidedignos y comprobables, la caja en “L” de material no absorbente y que no reaccione con el concreto se coloca en una superficie horizontal y nivelada, humedecer todas las superficies con petróleo además de la compuerta que separa ambas secciones, se debe cerciorarse que la compuerta este cerrada y sea movable, llenar la sección vertical del embudo en un solo acto, se deja descansar la muestra por un periodo de 1 minuto, se debe evaluar si existe algún tipo de segregación en la mezcla y posteriormente se desliza la compuerta liberando la mezcla en la sección horizontal. Una vez que se estabilice y la mezcla deje de moverse se registran las alturas H_1 y H_2 donde H_1 es la altura que la mezcla alcanza al inicio de la sección vertical y H_2 la altura que alcanza al final de la sección horizontal.

Figura 42

Llenado la caja en “L” en un solo acto y enrasamiento de la superficie



Nota. Fuente: Elaboración propia

Figura 43

Apertura de la compuerta y obtención de H1 y H2 del ensayo de caja en “L”



Nota. Fuente: Elaboración propia

Elaboración y Curado de Especímenes de Concreto Autocompactante en Laboratorio

A diferencia de un concreto convencional en la elaboración del concreto autocompactante los cambios en las características y condiciones de los materiales con respecto

a los estudios previos afectan considerablemente a las mezclas. Es debido a esto que la producción debe estar rigurosamente supervisada. (EFNARC et al., 2005)

Según la ACI 237R-07 se tienen los siguientes problemas al momento de elaborar las mezclas de concreto autocompactante:

- **Materiales:** Se debe contar con la misma fuente de materiales a lo largo de la duración de un estudio o proyecto empleando el concreto autocompactante, el origen de los materiales debe ser el mismo en todo el tiempo que se use el concreto autocompactante
- **Dosificación y Mezclas:** Se requiere determinar el proceso de mezcla de los materiales de concreto autocompactante, cada mezcla realizada debe tener un grado de homogeneidad. También está demostrado que al mezclar un concreto autocompactante se requiere de más tiempo al de un concreto convencional.

Preparación de los Materiales. En cuanto al almacenamiento de los materiales a emplear para la elaboración del concreto autocompactante es el mismo a seguir en el de un concreto convencional, pero ya que las mezclas son más susceptibles a variaciones debe tenerse mucho cuidado con los siguientes puntos: (EFNARC et al., 2005)

Agregado. Deben almacenarse para evitar que exista alguna clase de contaminación y evitando que se mezclen agregado grueso y fino, también debe evitarse la intemperie ya que esta afecta la humedad del agregado, deben emplearse para esto compartimientos que resguarden al agregado. Deben llenarse todos los almacenes del agregado antes del vaciado. (EFNARC et al., 2005)

- **Agregado Grueso:** Se preparó y almacenó el agregado grueso de la cantera de Vicho tomando en cuenta que se tamizo con la malla de 3/4” ya que establecimos este como el tamaño máximo del agregado usado en toda la investigación, se lavó el agregado

grueso para perder el material fino que se encuentran en su superficie, se secó el agregado grueso al aire libre y se almacenó en tachos impermeables de plástico con tapa para evitar pérdidas de humedad y contaminación del agregado grueso.

Figura 44

Tamizado del agregado grueso usando la malla de $\frac{3}{4}$ y su posterior lavado



Nota. Fuente: Elaboración propia

Figura 45

Secado del agregado grueso y almacenamiento para conservar su humedad



Nota. Fuente: Elaboración propia

- Agregado Fino: Se preparó y almacenó el agregado fino de la cantera de Cunyac secando la arena gruesa en plásticos al aire libre, el agregado fino se tamizó con la

mallas N°4 empleando para la investigación solamente todo lo que pasa dicha malla, el material que queda retenido no se considera y se descarta y se almacenó el agregado fino en tachos impermeables de plástico con tapa para evitar una contaminación del material o una variación de la humedad del agregado.

Figura 46

Secado al aire libre, tamizado y almacenamiento del agregado fino



Nota. Fuente: Elaboración propia

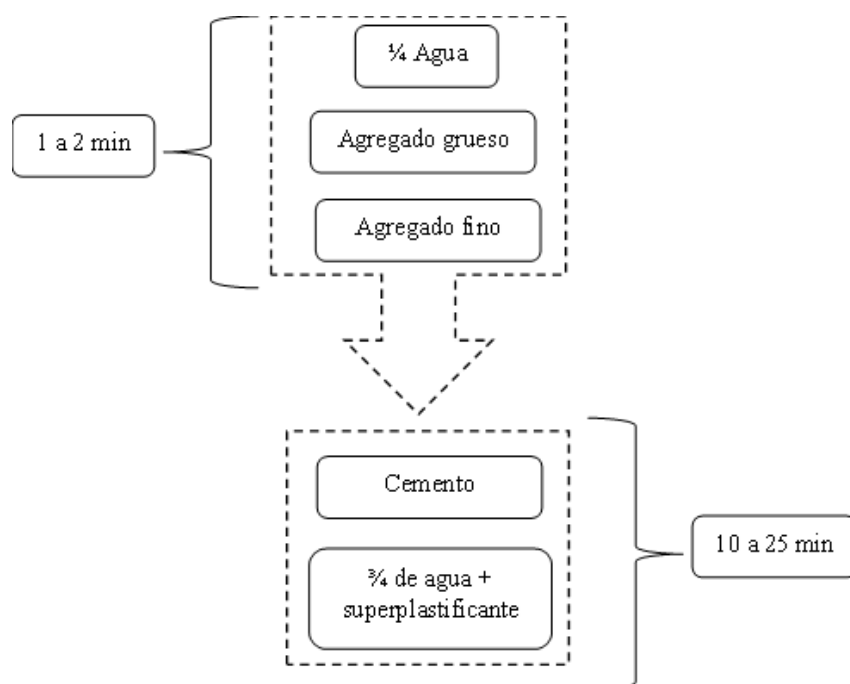
Cemento y Aditivo. La EFNARC no considera requisitos con respecto al cemento y al aditivo más allá de los provistos por los fabricantes.

Con respecto al cemento se almacenó bajo techo, no estuvo en contacto directo con el suelo, no estuvo expuesto a variaciones en su humedad y el aditivo superplastificante R-2027 fue protegido de contaminaciones o cambios de temperatura o humedad mantenido en un bidón provisto por la empresa que facilitó el producto, estuvo almacenado en un lugar fresco y no tuvo contacto con el sol.

Mezclado de los Componentes de Concreto Autocompactante. La secuencia de mezclado seguido en toda la presente investigación fue como se muestra a continuación:

Figura 47

Secuencia de mezclado del concreto autocompactante



Nota. Fuente: Elaboración propia

Se registrará el slump en todos los vaciados realizados.

Figura 48

Slump Flow de los vaciados de la mezcla CAC-355 y CAC-385



Nota. Fuente: Elaboración propia

Figura 49

Slump Flow de los vaciados de la mezcla CAC-420 y CAC-450



Nota. Fuente: Elaboración propia

Figura 50

Slump Flow de los vaciados de la mezcla CAC-470 y CAC-500



Nota. Fuente: Elaboración propia

Moldes Utilizados para el Vaciado. Para evaluar al concreto se requieren de moldes de acero, fierro fundido u otro material no absorbente que sean no permeables y que no reaccionen con el concreto, pueden emplearse además de los moldes deben ser revestidos de petróleo o algún otro material que permita su desmolde sin la destrucción de estos moldes.

Moldes para las Briquetas de Concreto Autocompactante. En nuestro estudio se siguieron las estipulaciones de la NTP 339.183, se emplearon moldes cilíndricos de plástico donde la altura(30cm) es dos veces la distancia del diámetro (15cm) revestidas con petróleo para su desencofrado. Se emplearon 20 briquetas por vaciado con las mezclas correctamente ajustadas.

Moldes para Viguetas de Concreto Autocompactante. En base a la NTP 339.183 se emplearon moldes de acero horizontales con geometría rectangular donde las paredes interiores eran limpias de cualquier tipo de fisuras o hendiduras, todas las paredes vecinas, extremos y la base de las vigas forman noventa grados y no sufrían de posibilidad de alabeo.

Procedimiento del Vaciado de Especímenes de Concreto Autocompactante. Primeramente se limpia y humedecen con petróleo todas las superficies de los moldes a emplearse con petróleo, se coloca sobre una superficie horizontal y nivelada los moldes, se vacía a las briqueteras y a los moldes de viguetas empleando un cucharón metálico desde una altura mayor a 50mm por encima sin compactar ni varillar de alguna manera, se elimina el exceso de mezcla en los moldes y se da un acabado a la superficie enrasando con un badilejo, después de 24 horas se desmoldan los especímenes con un inflador con cautela de no fisurarlas o golpear los moldes y los especímenes, se procede a marcar cada espécimen para su reconocimiento con la mezcla representada, la fecha de vaciado y el tipo de concreto empleado con un corrector y se procede a sumergir los especímenes en una poza con agua donde comenzarán su proceso de curado por 28 días

Figura 51

Elaboración y vaciado de briquetas de concreto autocompactante durante la investigación



Nota. Fuente: Elaboración propia

Figura 52

Elaboración y vaciado de viguetas de concreto autocompactante durante la investigación



Nota. Fuente: Elaboración propia

Curado de Especímenes de Concreto Autocompactante en Laboratorio. En base a las especificaciones de la NTP 339.183 Todos los especímenes fueron curados sumergiéndolas a una temperatura de 23°C en una poza llena de agua y libre de vibraciones por 28 días después del vaciado de briquetas.

Ensayos para Determinar las Propiedades Mecánicas del Concreto Autocompactante

Pasado el tiempo de curado estipulado se registró las briquetas y las viguetas de concreto autocompactante, se analizó el estado de los especímenes, que no presenten fisuras o golpes, también se registró el peso y las dimensiones de los especímenes y el marcado de los tercios a considerar en las viguetas para el ensayo a flexión.

Figura 53

Medición de las dimensiones y peso de los especímenes de concreto autocompactante



Nota. Fuente: Elaboración propia

Peso Unitario del CAC en Estado Endurecido. El peso unitario de las briquetas de concreto autocompactante será determinado mediante la relación entre el peso y el volumen de cada briketa.

Resistencia a la Compresión del Concreto Autocompactante. Este ensayo es muy determinante para poder caracterizar al concreto, es una de las propiedades más estudiadas del concreto a nivel mundial, se realiza en probetas cilíndricas de concreto, consiste en la aplicación de un esfuerzo axial en forma de carga sobre la briketa y la capacidad de esta a resistir esfuerzos.(NTP 339.034, 2008).

Normativa. NTP 339.034: “HORMIGÓN (CONCRETO). Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto, en muestras cilíndricas.”

Equipos. Máquina de Ensayos capaz de proveer una velocidad de 0.25MPa y que sea capaz de mantener esa velocidad durante al menos la segunda mitad del ensayo, debe estar calibrada y contar con un operador capacitado, bloques de acero donde se colocarán las probetas

cilíndricas contando con una distancia de por lo menos 3% mayor al diámetro de las probetas de concreto y un indicador de carga provisto por la máquina de ensayos. (NTP 339.183, 2013)

Preparación de las Briquetas. Para determinar la resistencia a la compresión de las briquetas estas se retiran del pozo de curado y cuanto más antes sea posible son sujetas al ensayo de compresión evitando la pérdida de humedad de las muestras y estas muestras están sujetas a un tiempo permisible con respecto a la edad del ensayo de la siguiente manera:(NTP 339.034, 2008).

Tabla 29

Tolerancia para efectuar el ensayo de la resistencia a la compresión

Edad de Ensayo	Tolerancia Permisible
24h	± 0.5h
3d	± 2h
7d	± 6h
28d	± 20h
90d	± 48h

Nota. Fuente: (NTP 339.034, 2008).

Procedimiento. Colocar una superficie sobre la base de la máquina, encima de la plataforma movable de la máquina de ensayo, en este caso fue un molde circular de acero y neopreno con un diámetro mayor al de las briquetas, limpiar las caras de contacto del molde de neopreno y colocar la briqueta encima, colocar otro molde circular de neopreno encima de la briqueta y en contacto con la superficie horizontal de la máquina de ensayos, alinear los ejes de la briqueta con el de los moldes de neoprenos, verificar que el marcador de carga aplicada a la briqueta este en 0, en la primera mitad del ensayo se puede aplicar una alta velocidad de carga y aplicar una velocidad de carga de 2.55 kg/cm² o de 451,35 kilogramos fuerza durante la segunda mitad del ensayo hasta que esta velocidad decrezca debido a la fractura de la briqueta

Figura 54

Briquetas de concreto autocompactante para evaluar su resistencia a la compresión



Nota. Fuente: Elaboración Propia

Cálculos. Para determinar la resistencia a la compresión se emplea la siguiente fórmula:

$$f'c = \frac{C}{A}$$

Donde:

$f'c$: Resistencia a la Compresión (kg/cm^2)

C : Carga máxima alcanzada de rotura aplicada (kg)

A : Área promedio de la sección recta (cm^2)

Módulo de Elasticidad.

Procedimiento. La ACI 237R-07 establece el módulo de elasticidad del concreto con la siguiente fórmula en base al peso unitario y de la resistencia a la compresión del concreto.

$$E_c = w_c^{1.5} * 0.043\sqrt{f'c}$$

Donde:

w_c : Peso unitario del concreto (kg/m^3)

f'_c : Resistencia a la compresión del concreto (MPa)

E_c : Módulo de Elasticidad del concreto (MPa)

La resistencia a la compresión y el peso unitario fueron obtenidos de las briquetas donde todas las briquetas realizadas estuvieron en el rango de 1500 y 2500 kg/m³ necesarios para usar la fórmula previa.

Ensayo de la Resistencia a la Flexión del Concreto Autocompactante. La resistencia a la flexión en vigas de concreto ensayadas con aplicación de cargas en los tercios de luz es un ensayo para poder determinar el módulo de rotura del concreto, una propiedad mecánica importante y depende en gran medida de la elaboración, los materiales, la producción del concreto, etc. (NTP 339.078, 2012)

Normativa. NTP 339.078: “CONCRETO. Método de ensayo para determinar la resistencia a la flexión del concreto en vigas simplemente apoyadas con cargas a los tercios del tramo”

Equipos. Máquina de ensayo que debe cumplir con los requerimientos de la NTP 339.078, no deben ensayarse en máquinas manuales que realicen el ensayo a una velocidad de carga variable, placas movibles de apoyo que sujetarán y transmitirán las cargas a la viga y soportes de apoyo de metal sobre la cual se pondrá la superficie de metal con las placas movible

Preparación de las Viguetas. La vigueta a ensayar debe tener una luz entre los apoyos igual a 3 veces la altura de la vigueta, todas las caras de la vigueta forman entre si ángulos rectos, el área de las caras de las viguetas debe ser lisa, sin fisuras de algún tipo, sin porosidad notable y con los tercios de la luz marcados con un material que no modifique a la vigueta. La prueba de la resistencia a la flexión se realiza lo más antes posible tras el sacado de la poza de curado ya que cuando se pierde la humedad de la viga el valor de su módulo de rotura disminuye. (NTP 339.078, 2012)

Procedimiento. Alinear los elementos de la maquina universal, colocar una plataforma en la parte inferior y superior con apoyos movibles sobre una superficie de acero, colocar las viguetas encima de la plataforma sobre las marcas más lejanas en la parte inferior y las marcas intermedias en la parte superior de la viga, se verifica el contacto de la viga con los apoyos y se comienza con el ensayo. Se aplica una carga de 0.9MPa/min a las viguetas, a la misma velocidad y sin interrupciones hasta que se produzca la rotura de los especímenes y registrar la carga máxima de rotura.

Figura 55

Colocación de la vigueta sobre los apoyos movibles y rotura en el tercio central



Nota. Fuente: Elaboración Propia

Cálculos. La falla de todas las vigas ocurrió en el tercio central del ensayo, por tanto:

$$M_r = \frac{PL}{bh^2}$$

Donde:

M_r : Módulo de rotura (kg/cm^2)

P : Carga máxima de rotura (kg)

L : Luz libre entre los apoyos extremos (cm)

b : Ancho promedio de la viga en el tercio que falla (cm)

h : Altura promedio de la viga en el tercio que falla (cm)

Capítulo IV

Resultados de la Investigación

Resultados de la Caracterización de los Agregados

Análisis Granulométrico

Agregado Grueso. Se consideró un tamaño máximo nominal de ½", un tamaño máximo de ¾", se calculó un módulo de fineza de 6.74 y se determinó entre los límites del HUSO 67 de acuerdo a la normativa NTP 400.037.

De acuerdo a la norma NTP 400.012, y el procedimiento seguido se tiene el siguiente valor para el módulo de fineza:

$$MF = \frac{\%1 \frac{1}{2}'' + \%3/4'' + \%3/8'' + \%N^{\circ}4 + \%N^{\circ}8 + \%N^{\circ}16 + \%N^{\circ}30 + \%N^{\circ}50 + \%N^{\circ}100}{100}$$

$$MF = \frac{0 + 0 + 74.72 + 99.05 + 100 + 100 + 100 + 100 + 100}{100} = 6.74$$

El módulo de fineza del agregado de Vicho es de 6.74.

Tabla 30

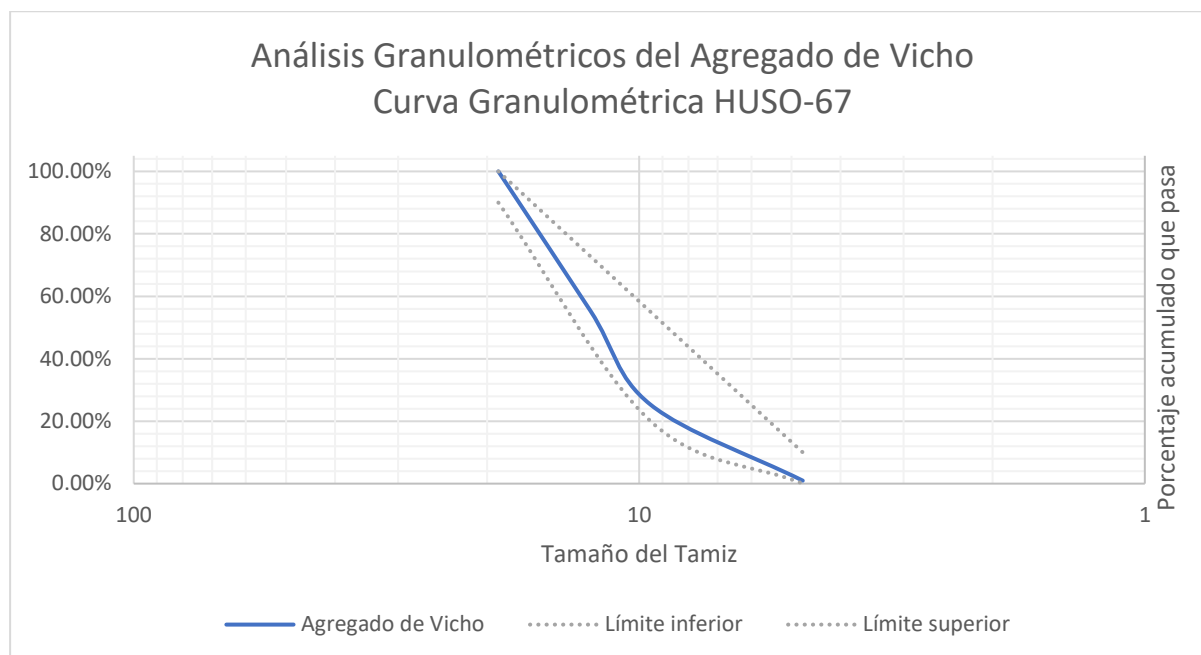
Análisis granulométrico del agregado grueso de Vicho

TAMAÑO DEL TAMIZ		Peso Retenido (gr)	% Peso Retenido	% Peso Retenido Acumulado	% Peso acumulativo que pasa	Huso Granulométrico N° 67 NTP 400.037	
pulgadas	mm					Límite inferior	Limite Superior
¾"	19	0	0.00%	0.00%	100.00%	90%	100%
½"	12.5	575.43	44.59%	44.59%	55.41%	-	-
⅜"	9.5	388.85	30.13%	74.72%	25.28%	20%	55%
N° 4	4.75	313.96	24.33%	99.05%	0.95%	0%	10%
Cazuela		12.28	0.95%	100.00%			
Tamaño Máximo		¾"					
Tamaño Máximo Nominal		½"					
Módulo de Fineza		6.74					

Nota. Fuente: Elaboración Propia

Figura 56

Análisis granulométrico del agregado grueso de Vicho



Nota. Fuente: Elaboración Propia

Agregado Fino. Se calculó un módulo de fineza de 2.50 y el agregado cumple con los requerimientos de la NTP 400.037.

De acuerdo a la norma NTP 400.012, y el procedimiento seguido se tiene el siguiente valor para el módulo de fineza:

Tabla 31

Análisis granulométrico del agregado fino de Cunyac

TAMAÑO DEL TAMIZ		Peso Retenido (gr)	% Peso Retenido	% Peso Retenido Acumulado	% Porcentaje acumulativo que pasa	NTP 400.037	
pulgadas	mm					Límite inferior	Límite Superior
N° 4	4.75	0.00	0.00%	0.00%	100.00%	95%	100%
N° 8	2.36	63.41	5.79%	5.79%	94.21%	80%	100%
N° 16	1.18	165.13	15.08%	20.87%	79.13%	50%	85%
N° 30	0.6	280.18	25.59%	46.46%	53.54%	25%	60%
N° 50	0.3	371.23	33.90%	80.36%	19.64%	5%	30%

N° 100	0.15	177.07	16.17%	96.53%	3.47%	0%	10%
N° 200	0.075	33.76	3.08%	99.61%	0.39%	0%	3%
CAZUELA		4.26	0.39%	100.00%	0.00%		

Nota. Fuente: Elaboración Propia

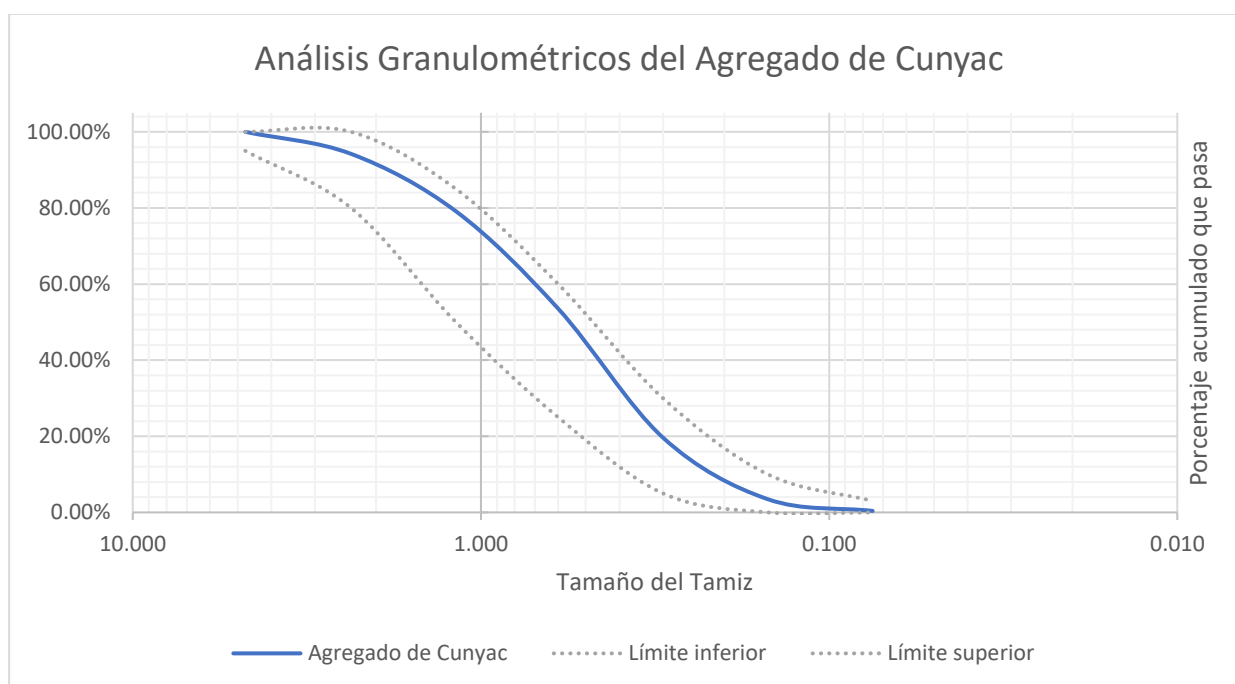
$$MF = \frac{\%N^{\circ}100 + \%N^{\circ}50 + \%N^{\circ}30 + \%N^{\circ}16 + \%N^{\circ}8 + \%N^{\circ}4 + \%3/8" + \%3/4" + \%1 \frac{1}{2}"}{100}$$

$$MF = \frac{96.53 + 80.36 + 46.46 + 20.87 + 5.79}{100} = 2.50$$

El módulo de fineza del agregado de Cunyac es 2.50.

Figura 57

Curva granulométrica del agregado fino de Cunyac



Nota. Fuente: Elaboración Propia

Contenido de Humedad

Contenido de Humedad del Agregado Grueso de Vicho. Se obtuvo un contenido de humedad promedio representativo de todo el agregado grueso de Vicho de 1.34%.

Tabla 32*Resultados del porcentaje de humedad del agregado grueso de Vicho*

Descripción	Muestra		
	M1	M2	M3
Masa de la muestra húmeda original (gr)	5228.83	5326.5	5136.47
Masa de la muestra seca original (gr)	5160.87	5252.44	5071.05
Contenido total de humedad evaporable de muestra en porcentaje	1.32%	1.41%	1.29%
Contenido total de humedad evaporable promedio de muestra en porcentaje (%)		1.34%	

Nota. Fuente: Elaboración Propia

Contenido de Humedad del Agregado Fino de Cunyac. Se obtuvo un contenido de humedad promedio representativo de todo el agregado fino de Cunyac de 3.13%.

Tabla 33*Contenido de humedad del agregado fino de Cunyac*

Descripción	Muestra		
	M1	M2	M3
Peso Recipiente (gr)	239.05	229.58	304.94
Peso Recipiente + Muestra Húmeda (gr)	1226.09	1140.38	1018.16
Peso Muestra Húmeda (gr)	987.04	910.80	713.22
Peso Recipiente + Muestra tras Secado (gr)	1194.70	1110.26	999.57
Peso Muestra tras Secado (gr)	955.65	880.68	694.63
Contenido de Humedad Evaporable (%)	3.28	3.42	2.68
Contenido de Humedad Evaporable Promedio (%)		3.13	

Nota. Fuente: Elaboración Propia***Cantidad de Material Fino que pasa el Tamiz N°200***

Cantidad de Material Fino que pasa el Tamiz N°200 del Agregado Grueso. La cantidad de finos que se tienen en una muestra de agregado grueso de Vicho es de 2.14% tomando este valor como parámetro representativo de todo el agregado.

Tabla 34*Cantidad de material fino que pasa el tamiz N°200 del agregado grueso de Cunyac*

Descripción	Muestra		
	M1	M2	M3
Peso Recipiente Antes del Lavado (gr)	241.41	241.41	241.41
Masa de la Muestra Seca Previo al Lavado + Recipiente (gr)	2000.91	1723.39	1329.95
Masa de la Muestra Seca Previo al Lavado (gr)	1759.50	1481.98	1088.54
Peso Recipiente Después del Lavado (gr)	241.41	249.55	343.70
Masa de la Muestra Seca Después del Lavado + Recipiente (gr)	1945.13	1702.21	1418.33
Masa de la Muestra Seca Después del Lavado(gr)	1703.72	1452.66	1074.63
Porcentaje de Masa que pasa la malla 200 (%)	3.17	1.98	1.28
Porcentaje Promedio de Masa que pasa la malla 200 (%)	2.14%		

Nota. Fuente: Elaboración Propia

Cantidad de Material Fino que pasa el Tamiz N°200 del Agregado Fino. La cantidad de finos que se tienen en una muestra de agregado fino de Cunyac es de 5.83% tomando este dato como parámetro representativo de todo el agregado.

Tabla 35*Cantidad de material fino que pasa el tamiz N°200 del agregado fino de Cunyac*

Descripción	Muestra		
	M1	M2	M3
Peso Recipiente Antes del Lavado (gr)	251.72	157.03	343.83
Masa de la Muestra Seca Previo al Lavado + Recipiente (gr)	1256.13	1226.53	1361.05
Masa de la Muestra Seca Previo al Lavado (gr)	1004.41	1069.50	1017.22
Peso Recipiente Después del Lavado (gr)	343.83	242.16	200.14
Masa de la Muestra Seca Después del Lavado + Recipiente (gr)	1303.55	1242.22	1150.63
Masa de la Muestra Seca Después del Lavado(gr)	959.72	1000.06	950.49
Porcentaje de Masa que pasa la malla 200 (%)	4.45	6.49	6.56
Porcentaje Promedio de Masa que pasa la malla 200 (%)	5.83%		

Nota. Fuente: Elaboración Propia

Peso Específico y Absorción

Peso Específico del Agregado Grueso. Se calculó un peso específico de 2.67, una densidad OD promedio de 2661.07 y un valor de absorción promedio de 2.04% para el agregado grueso de Vicho, Estos valores son representativos del agregado en general.

Tabla 36

Peso específico y absorción del agregado grueso de Vicho

Descripción	Muestra		
	M1	M2	M3
B: Cantidad de Masa de la Muestra Saturada Superficialmente Seca (gr)	2169.79	2155.20	2193.86
C: Cantidad de masa aparente de la Muestra Sumergida (gr)	1371.00	1341.00	1411.20
A: Cantidad de la Muestra Seca (gr)	2127.89	2111.74	2148.93
Peso específico de masa	2.66	2.59	2.75
Peso específico de masa promedio		2.67	
Peso específico (sss)	2.72	2.65	2.80
Peso específico aparente	2.81	2.74	2.91
Absorción (%)	1.97	2.06	2.09
Absorción promedio (%)		2.04	
Densidad OD	2657.23	2587.15	2738.81
Densidad OD promedio		2661.07	
Densidad SSD	2709.56	2640.40	2796.07
Densidad SSD promedio		2715.34	
Densidad Aparente	2804.33	2733.04	2905.61
Densidad Aparente promedio		2814.33	

Nota. Fuente: Elaboración Propia

Peso Específico del Agregado Fino. Se calculó un peso específico de 2.59, una densidad OD promedio de 2579.37 y un valor de absorción promedio de 1.93% para el agregado fino de Cunyac. Estos valores son representativos del agregado en general.

Tabla 37*Peso específico y absorción del agregado fino*

Descripción	Muestra		
	M1	M2	M3
A: Cantidad de Masa de la Muestra tras secado (gr)	293.90	294.59	294.52
B: Cantidad de masa del Picnómetro llenado con agua hasta la marca de calibración (gr)	651.30	675.86	651.95
C: Masa del Picnómetro llenado con la muestra y agua hasta la marca de calibración (gr)	837.61	861.91	838.19
S: Cantidad de la muestra saturada superficialmente seca (gr)	300.00	300.00	300.08
Gravedad Especifica (OD)	2.59	2.59	2.59
Gravedad Especifica (OD) Promedio		2.59	
Gravedad Especifica (SSD)	2.64	2.63	2.64
Gravedad Especifica (SSD) promedio		2.64	
Densidad (OD) kg/m ³	2578.64	2578.79	2580.67
Densidad (OD) kg/m ³ promedio		2579.37	
Densidad (SSD) kg/m ³	2632.16	2626.15	2629.39
Densidad (SSD) kg/m ³ promedio		2629.23	
Densidad Aparente kg/m ³	2724.84	2707.33	2713.19
Densidad Aparente kg/m ³ promedio		2715.12	
Absorción %	2.08	1.84	1.89
Absorción % promedio		1.93	

Nota. Fuente: Elaboración Propia***Peso Unitario Suelto de los Agregados***

Peso Unitario Suelto del Agregado Grueso. El peso unitario suelto promedio del agregado grueso de Vicho fue de 1414.47 kg/m³.

Tabla 38*Resultados del peso unitario Suelto del agregado grueso de Vicho*

Descripción	Muestra		
	M1	M2	M3
Peso del molde (kg)	7.972	7.972	7.972
Peso del molde + agregado (kg)	12.165	12.244	12.215
Peso del agregado seco (kg)	4.193	4.272	4.243
Volumen del molde (m ³)	0.002995	0.002995	0.002995
Peso unitario (kg/m ³)	1400.107	1426.486	1416.803
Peso unitario promedio (kg/m ³)		1414.47	

Nota. Fuente: Elaboración Propia

Peso Unitario Suelto del Agregado Fino. El peso unitario suelto promedio del agregado fino de Cunyac fue de 1649.81 kg/m³.

Tabla 39

Resultados del peso unitario Suelto del agregado fino de Cunyac

Descripción	Muestra		
	M1	M2	M3
Peso Recipiente (gr)	4235.97	4235.97	4235.97
Altura del Recipiente (cm)	11.50	11.50	11.50
Diámetro del Recipiente (cm)	10.20	10.20	10.20
Volumen del Recipiente (cm ³)	939.70	939.70	939.70
Peso del Recipiente + Peso de la Muestra Suelta (gr)	5786.30	5785.99	5786.58
Peso Unitario Suelto (kg/m ³)	1649.82	1649.49	1650.12
Peso Unitario Suelto Promedio (%)	1649.81		

Nota. Fuente: Elaboración Propia

Peso Unitario Compactado de los Agregados

Peso Unitario Compactado del Agregado Grueso de Vicho. El peso unitario compactado promedio del agregado grueso de Vicho fue de 1598.56 kg/m³.

Tabla 40

Resultados del peso unitario compactado del agregado grueso de Vicho

Descripción	Muestra		
	M1	M2	M3
Peso del molde (kg)	7.972	7.972	7.972
Peso del molde + agregado (kg)	12.702	12.796	12.78
Peso del agregado seco (kg)	4.73	4.824	4.808
Volumen del molde (m ³)	0.002995	0.002995	0.002995
Peso unitario (kg/m ³)	1579.42	1610.81	1605.46
Peso unitario promedio (kg/m ³)	1598.56		

Nota. Fuente: Elaboración Propia

Peso Unitario Compactado del Agregado Fino de Cunyac. El peso unitario compactado promedio del agregado fino de Cunyac fue de 1799.59kg/m³.

Tabla 41*Resultados del peso unitario compactado del agregado fino de Cunyac*

Descripción	Muestra		
	M1	M2	M3
Peso Recipiente (gr)	4235.97	4235.97	4235.97
Altura del Recipiente (cm)	11.50	11.50	11.50
Diámetro del Recipiente (cm)	10.20	10.20	10.20
Volumen del Recipiente (cm ³)	939.70	939.70	939.70
Peso del Recipiente + Peso de la Muestra Compactada (gr)	5921.15	5935.17	5924.81
Peso Unitario Suelto (kg/m ³)	1793.32	1808.24	1797.22
Peso Unitario Suelto Promedio	1799.59		

Nota. Fuente: Elaboración Propia***Ensayo de Abrasión los Ángeles***

Se obtuvo un desgaste de 28.49% en el agregado grueso de Vicho

Tabla 42*Resultados del agregado grueso de Vicho en el ensayo de abrasión*

Descripción	Muestra		
	M1	M2	M3
Masa original de la muestra ensayada (gr)	5000.23	5000.56	5000.15
Masa final de la muestra ensayada (gr)	3577.2	3581.35	3569.16
Abrasión (Método de los ángeles) (%)	28.46%	28.38%	28.62%
Abrasión promedio (Método de los ángeles) (%)	28.49%		

Nota. Fuente: Elaboración Propia**Resultados del Diseño de Mezclas del Concreto Autocompactante*****Máxima Compacidad del Esqueleto Granular***

Se obtuvieron los siguientes resultados de la máxima compacidad del esqueleto granular de los agregados combinados de Cunyac y Vicho

Tabla 43*Máxima compacidad de arena de Cunyac y agregado grueso de Vicho*

Descripción	Muestras		
	M1	M2	M3
A: Peso del molde donde se realiza el ensayo (kg)	6.865	6.865	6.865
V: Volumen del molde donde se realiza el ensayo (L)	3.170	3.170	3.170
B: Peso del molde más muestra para grava/arena: 35/65% (kg)	13.030	13.005	13.012
C: Peso del molde más muestra para grava/arena: 40/60% (kg)	12.932	12.915	12.921
D: Peso del molde más muestra para grava/arena: 45/55% (kg)	12.920	13.170	13.025
E: Peso del molde más muestra para grava/arena: 50/50% (kg)	13.065	13.103	13.080
F: Peso del molde más muestra para grava/arena: 55/45% (kg)	13.120	12.920	12.947
G: Peso unitario compactado del agregado grueso (kg/m ³)		1598.940	
H: Peso unitario compactado del agregado fino (kg/m ³)		1649.810	
I: Gravedad específica del agregado grueso		2.668	
J: Gravedad específica del agregado fino		2.586	
Volumen del agregado grueso (35/65) (%)	25.52	25.41	25.44
Volumen del agregado grueso (40/60) (%)	28.70	28.62	28.65
Volumen del agregado grueso (45/55) (%)	32.22	33.55	32.78
Volumen del agregado grueso (50/50) (%)	36.66	36.89	36.75
Volumen del agregado grueso (55/45) (%)	40.68	39.38	39.56
Volumen del agregado fino (35/65) (%)	48.89	48.69	48.75
Volumen del agregado fino (40/60) (%)	44.41	44.29	44.33
Volumen del agregado fino (45/55) (%)	40.63	42.31	41.34
Volumen del agregado fino (50/50) (%)	37.82	38.05	37.91
Volumen del agregado fino (55/45) (%)	34.34	33.24	33.39
Volumen de vacíos para grava/arena: 35/65 (%)	25.59	25.89	25.81
Volumen de vacíos promedio para grava/arena: 35/65 (%)		25.76	
Volumen de vacíos para grava/arena: 40/60 (%)	26.89	27.09	27.02
Volumen de vacíos promedio para grava/arena: 40/60 (%)		27.00	
Volumen de vacíos para grava/arena: 45/55 (%)	27.15	24.14	25.88
Volumen de vacíos promedio para grava/arena: 45/55 (%)		25.72	
Volumen de vacíos para grava/arena: 50/50 (%)	25.52	25.06	25.34
Volumen de vacíos promedio para grava/arena: 50/50 (%)		25.30	
Volumen de vacíos para grava/arena: 55/45 (%)	24.97	27.37	27.05
Volumen de vacíos promedio para grava/arena: 55/45 (%)		26.46	

Nota. Fuente: Elaboración Propia

Por tanto, la máxima compacidad se lograría con el mínimo volumen de vacíos que es para la combinación de grava – arena: 45/55%.

Proporciones Definidas del Diseño de Mezclas del Concreto Autocompactante

Como resultado del análisis se llega a las siguientes proporciones para la producción de muestras de los especímenes de estudio.

Tabla 44

Dosificación para la preparación de los especímenes de estudio

Tipo de mezcla	Cemento (kg/m3)	Agua (lts/m3)	Agregado grueso (kg/m3)	Agregado fino (kg/m3)	SP (kg/m3)
CAC-355	355.00	202.35	807.46	886.90	2.49
CAC-385	385.00	219.45	769.09	823.73	2.43
CAC-420	420.00	205.80	775.49	878.15	3.53
CAC-450	450.00	220.50	793.07	798.71	3.38
CAC-470	470.00	202.10	777.08	823.95	3.90
CAC-500	500.00	215.00	781.88	820.02	4.00

Nota. Fuente: Elaboración Propia

Resultados de los Ensayos de Autocompactabilidad del Concreto Autocompactante

Resultados de las Pruebas de Fluidéz del Mortero

Se obtuvieron los siguientes resultados del Mini Slump Flow y el tiempo de descarga del embudo en “V” del mortero:

Tabla 45

Resultados de las pruebas de fluidez al mortero de la mezcla CAC-355

DESCRIPCIÓN	N° DE ENSAYO	
	1	2
Contenido de Cemento (kg/m3)	355 kg/m3	
Relación Agua/Cemento	0.56	
Volúmen de la Mezcla Ensayada (L)	1.6	
Proporción de la mezcla ensayada		
Arena (%)	52.15%	
Arena (kg)	1.536	1.548
Cemento (kg)	0.568	0.568
Agua (L)	0.330	0.330
Aditivo como Porcentaje del Cemento (%)	0.80	0.75
Aditivo como Peso (kg)	0.0123	0.0116
Resultados del Ensayo		

Mini Slump Flow (cm)	30.3	27.2
"V" Funnel del Mortero (s)	15.2	11.01

Nota. Fuente: Elaboración Propia

Tabla 46

Resultados de las pruebas de fluidez al mortero de la mezcla CAC-385

DESCRIPCION	N° DE ENSAYO	
	1	2
Contenido de Cemento (kg/m3)	385 kg/m3	
Relación Agua/Cemento	0.56	
Volúmen de la Mezcla Ensayada (L)	1.6	
Proporción de la mezcla ensayada		
Arena (%)	48.50%	
Arena (kg)	1.536	1.443
Cemento (kg)	0.568	0.616
Agua (L)	0.330	0.356
Aditivo como Porcentaje del Cemento (%)	0.80	0.75
Aditivo como Peso (kg)	0.0045	0.0046
Resultados del Ensayo		
Mini Slump Flow (cm)	32.4	30.1
"V" Funnel del Mortero (s)	13.6	9.35

Nota. Fuente: Elaboración Propia

Tabla 47

Resultados de las pruebas de fluidez al mortero de la mezcla CAC-420

DESCRIPCION	N° DE ENSAYO	
	1	2
Contenido de Cemento (kg/m3)	420 kg/m3	
Relación Agua/Cemento	0.49	
Volúmen de la Mezcla Ensayada (L)	1.6	
Proporción de la mezcla ensayada		
Arena (%)	50.00%	
Arena (kg)	1.426	1.426
Cemento (kg)	0.672	0.672
Agua (L)	0.339	0.339
Aditivo como Porcentaje del Cemento (%)	0.80	0.85
Aditivo como Peso (kg)	0.0054	0.0057
Resultados del Ensayo		
Mini Slump Flow (cm)	22.6	26.5
"V" Funnel del Mortero (s)	15.8	13.2

Nota. Fuente: Elaboración Propia

Tabla 48*Resultados de las pruebas de fluidez al mortero de la mezcla CAC-450*

DESCRIPCION	N° DE ENSAYO	
	1	2
Contenido de Cemento (kg/m3)	450 kg/m3	
Relación Agua/Cemento	0.49	
Volúmen de la Mezcla Ensayada (L)	1.6	
Proporción de la mezcla ensayada		
Arena (%)	49.00%	
Arena (kg)	1.426	1.426
Cemento (kg)	0.672	0.672
Agua (L)	0.339	0.339
Aditivo como Porcentaje del Cemento (%)	0.80	0.75
Aditivo como Peso (kg)	0.0054	0.0050
Resultados del Ensayo		
Mini Slump Flow (cm)	30.8	29.5
"V" Funnel del Mortero (s)	9.53	11

Nota. Fuente: Elaboración Propia**Tabla 49***Resultados de las pruebas de fluidez al mortero de la mezcla CAC-470*

DESCRIPCION	N° DE ENSAYO	
	1	2
Contenido de Cemento (kg/m3)	470 kg/m3	
Relación Agua/Cemento	0.42	
Volúmen de la Mezcla Ensayada (L)	1.8	
Proporción de la mezcla ensayada		
Arena (%)	45.95%	
Arena (kg)	1.562	1.562
Cemento (kg)	0.846	0.846
Agua (L)	0.366	0.366
Aditivo como Porcentaje del Cemento (%)	0.70	0.75
Aditivo como Peso (kg)	0.0059	0.0063
Resultados del Ensayo		
Mini Slump Flow (cm)	25.4	29.1
"V" Funnel del Mortero (s)	16.2	10

Nota. Fuente: Elaboración Propia

Tabla 50*Resultados de las pruebas de fluidez al mortero de la mezcla CAC-500*

DESCRIPCION	N° DE ENSAYO	
	1	2
Contenido de Cemento (kg/m3)	500 kg/m3	
Relación Agua/Cemento	0.42	
Volúmen de la Mezcla Ensayada (L)	1.8	
Proporción de la mezcla ensayada		
Arena (%)	42.00%	
Arena (kg)	1.398	1.398
Cemento (kg)	0.9	0.9
Agua (L)	0.387	0.387
Aditivo como Porcentaje del Cemento (%)	0.70	0.75
Aditivo como Peso (kg)	0.0063	0.0068
Resultados del Ensayo		
Mini Slump Flow (cm)	23.7	30.1
"V" Funnel del Mortero (s)	14.5	9.35

Nota. Fuente: Elaboración Propia***Resultados de las Pruebas de Autocompactabilidad del Concreto***

Se obtuvieron los siguientes resultados en las pruebas de laboratorio

Tabla 51*Resultados de las pruebas de autocompactación al concreto de la mezcla CAC-355*

DESCRIPCIÓN	ENSAYO			
	1	2	3	4
Relación del agregado grueso y el esqueleto granular (%)	47.50%	47.85%	47.85%	50.50%
Relación del volúmen del agregado grueso con respecto al volúmen total (%)	28.00%	28.66%	28.66%	30.24%
Porcentaje de agregado fino del mortero (%)	50.50%	50.30%	50.30%	48.90%
Porcentaje de Superplastificante con el cemento (%)	0.50%	0.85%	0.85%	0.70%
Cantidad de cemento (kg/m3)	355			
Volúmen de Mezcla (m3)	0.015			
Dosificaciones				
w/c	0.62	0.578	0.57	0.57
Grava (kg)	11.54	11.63	11.63	12.27
Arena (kg)	14.23	14.14	14.14	13.44
Cemento (kg)	5.33	5.33	5.33	5.33
Agua (L)	3.5	3.27	3.22	3.23
Aditivo (kg)	0.026	0.045	0.045	0.037

Resultado de Ensayos					
T50 (seg)		1.28	7.22	4.93	4.34
Slump Flow (cm)		58.5	53.5	50.50	54.00
V-Funnel (s)		2.51	13.72	7.41	7.82
L-box	H1 (cm)	-	10	12	12.1
	H2 (cm)	-	7.4	7.5	8.8
	H2/H1	-	0.74	0.63	0.73
Tiempo de Mezclado	8-15 minutos con reposo de 1 min				
Observaciones	En el ensayo N° 01 se tuvo problemas en la compuerta de la caja en "L"				

Nota. Fuente: Elaboración Propia

Tabla 52

Resultados de las pruebas de autocompactación al concreto de la mezcla CAC-385

DESCRIPCIÓN	ENSAYO				
	1	2	3	4	5
Relación del agregado grueso y el esqueleto granular (%)	50.00%	47.00%	47.00%	47.00%	48.10%
Relación del volúmen del agregado grueso con respecto al volúmen total (%)	30.00%	28.00%	28.15%	28.15%	28.80%
Porcentaje de agregado fino del mortero (%)	50.00%	48.50%	46.80%	46.80%	44.50%
Porcentaje de Superplastificante con el cemento (%)	0.75%	0.75%	0.75%	0.80%	0.63%
Cantidad de cemento (kg/m3)			385		
Volúmen de Mezcla (m3)			0.015		
Dosificaciones					
w/c	0.535	0.59	0.575	0.57	0.57
Grava (kg)	12.15	11.42	11.42	11.42	11.69
Arena (kg)	13.8	13.25	13.25	13.25	12.48
Cemento (kg)	5.78	5.78	5.78	5.78	5.78
Agua (L)	3.28	3.59	3.5	3.47	3.47
Aditivo (kg)	0.043	0.043	0.043	46.2	0.036
Resultado de Ensayos					
T50 (seg)	1.63	1.02	1.79	3.37	5.32
Slump Flow (cm)	62.0	60.0	55.00	55.00	52.5
V-Funnel (s)	5.27	3.85	4.01	3.85	7.62
L-box	H1 (cm)	13.50	11.00	11.50	12.10
	H2 (cm)	6.50	7.00	8.00	8.95
	H1/H2	0.48	0.64	0.84	0.74
Tiempo de Mezclado	8-15 minutos con reposo de 1 min				

Nota. Fuente: Elaboración Propia

Tabla 53*Resultados de las pruebas de autocompactación al concreto de la mezcla CAC-420*

DESCRIPCIÓN	ENSAYO		
	1	2	3
Relación del agregado grueso y el esqueleto granular (%)	47.00%	47.00%	48.50%
Relación del volumen del agregado grueso con respecto al volumen total (%)	28.00%	28.15%	29.00%
Porcentaje de agregado fino del mortero (%)	49.79%	47.25%	47.60%
Porcentaje de Superplastificante con el cemento (%)	0.85%	0.85%	0.84%
Cantidad de cemento (kg/m3)		420	
Volumen de Mezcla (m3)		0.015	
Dosificaciones			
w/c	0.49	0.49	0.49
Grava (kg)	11.42	11.42	11.79
Arena (kg)	14.09	13.37	13.3
Cemento (kg)	6.3	6.3	6.3
Agua (L)	3.27	3.26	3.26
Aditivo (kg)	0.054	0.054	0.053
Resultado de Ensayos			
T50 (seg)	7.56	5.13	5.07
Slump Flow (cm)	54.5	62.5	61.50
V-Funnel (s)	8.28	13.18	12.5
L-box	H1 (cm)	10.00	10.50
	H2 (cm)	7.00	8.10
	H2/H1	0.70	0.77
Tiempo de Mezclado	8-15 minutos con reposo de 1 min		

Nota. Fuente: Elaboración Propia**Tabla 54***Resultados de las pruebas de autocompactación al concreto de la mezcla CAC-450*

DESCRIPCIÓN	ENSAYO		
	1	2	3
Relación del agregado grueso y el esqueleto granular (%)	47.00%	47.00%	49.60%
Relación del volumen del agregado grueso con respecto al volumen total (%)	28.00%	28.15%	29.70%
Porcentaje de agregado fino del mortero (%)	46.50%	43.76%	43.70%

Porcentaje de Superplastificante con el cemento (%)	0.75%	0.75%	0.75%
Cantidad de cemento (kg/m3)		450	
Volumen de Mezcla (m3)		0.015	
Dosificaciones			
w/c	0.49	0.49	0.49
Grava (kg)	11.42	11.42	12.05
Arena (kg)	13.16	12.39	12.1
Cemento (kg)	6.75	6.75	6.75
Agua (L)	3.48	3.48	3.48
Aditivo (kg)	0.051	0.051	0.05
Resultado de Ensayos			
T50 (seg)	3.42	2.58	3.16
Slump Flow (cm)	56.5	58.0	57.00
V-Funnel (s)	11.4	7.79	8.35
L-box	H1 (cm)	7.72	11.00
	H2 (cm)	6.50	8.00
	H2/H1	0.84	0.73
Tiempo de Mezclado	8-15 minutos con reposo de 1 min		

Nota. Fuente: Elaboración Propia

Tabla 55

Resultados de las pruebas de autocompactación al concreto de la mezcla CAC-470

DESCRIPCIÓN	ENSAYO		
	1	2	3
Relación del agregado grueso y el esqueleto granular (%)	47.00%	47.00%	48.60%
Relación del volumen del agregado grueso con respecto al volumen total (%)	28.00%	28.15%	29.10%
Porcentaje de agregado fino del mortero (%)	48.70%	45.26%	44.70%
Porcentaje de Superplastificante con el cemento (%)	0.85%	0.85%	0.83%
Cantidad de cemento (kg/m3)		470	
Volumen de Mezcla (m3)		0.015	
Dosificaciones			
w/c	0.42	0.43	0.43
Grava (kg)	11.42	12.81	11.81
Arena (kg)	13.78	11.42	12.48
Cemento (kg)	7.05	7.05	7.05
Agua (L)	3.14	3.2	3.41
Aditivo (kg)	0.06	0.06	0.059

Resultado de Ensayos			
T50 (seg)	6.23	5.12	6.3
Slump Flow (cm)	72.0	75.0	71.00
V-Funnel (s)	15.11	16.73	12.64
L-box	H1 (cm)	10.00	9.00
	H2 (cm)	8.00	8.80
	H2/H1	0.80	0.98
Tiempo de Mezclado	8-15 minutos con reposo de 1 min		

Nota. Fuente: Elaboración Propia

Tabla 56

Resultados de las pruebas de autocompactación al concreto de la mezcla CAC-500

DESCRIPCIÓN	ENSAYO		
	1	2	3
Relación del agregado grueso y el esqueleto granular (%)	48.00%	47.00%	48.90%
Relación del volumen del agregado grueso con respecto al volumen total (%)	29.00%	28.15%	29.00%
Porcentaje de agregado fino del mortero (%)	45.00%	42.05%	44.60%
Porcentaje de Superplastificante con el cemento (%)	0.75%	0.75%	0.80%
Cantidad de cemento (kg/m3)		500	
Volúmen de Mezcla (m3)		0.015	
Dosificaciones			
w/c	0.42	0.43	0.43
Grava (kg)	11.66	11.42	11.88
Arena (kg)	12.63	11.9	12.42
Cemento (kg)	7.5	7.5	7.5
Agua (L)	3.32	3.39	3.39
Aditivo (kg)	0.056	0.056	0.6
Resultado de Ensayos			
T50 (seg)	4.35	5.07	4.27
Slump Flow (cm)	71.2	69.5	70.00
V-Funnel (s)	21.25	20.61	11.6
L-box	H1 (cm)	9.00	9.50
	H2 (cm)	7.00	7.50
	H2/H1	0.78	0.79
Tiempo de Mezclado	8-15 minutos con reposo de 1 min		

Nota. Fuente: Elaboración Propia

Resultados de los Ensayos de las Propiedades Mecánicas del Concreto Autocompactante

Peso Unitario Endurecido del Concreto Autocompactante

Los pesos unitarios obtenidos para los diferentes diseños de mezcla se resumen en las siguientes tablas.

Tabla 57

Peso unitario endurecido del CAC-355

BRIQUETA	REGISTRO	PESO (kg)	Ø prom (cm)	AREA (cm2)	H prom (cm)	VOLUMEN (m3)	P.U (kg/m3)
1	CAC-355-1	12.790	15.2	181.0	30.20	0.0055	2339.31
2	CAC-355-2	12.985	15.2	182.1	30.25	0.0055	2357.83
3	CAC-355-3	12.780	15.2	182.2	30.40	0.0055	2306.88
4	CAC-355-4	12.770	15.2	181.2	30.25	0.0055	2330.25
5	CAC-355-5	12.945	15.2	182.1	30.25	0.0055	2350.56
6	CAC-355-6	12.770	15.2	182.1	30.25	0.0055	2318.79
7	CAC-355-7	12.925	15.2	181.3	30.30	0.0055	2352.32
8	CAC-355-8	12.945	15.2	181.6	30.30	0.0055	2352.86
9	CAC-355-9	12.755	15.2	181.7	30.25	0.0055	2320.63
10	CAC-355-10	12.845	15.2	181.5	30.40	0.0055	2327.77
11	CAC-355-11	12.805	15.2	181.0	30.35	0.0055	2330.47
12	CAC-355-12	12.890	15.2	181.3	30.25	0.0055	2350.60
13	CAC-355-13	13.050	15.2	181.8	30.25	0.0055	2372.75
14	CAC-355-14	13.040	15.3	183.0	30.25	0.0055	2355.42
15	CAC-355-15	13.055	15.2	181.0	30.20	0.0055	2387.78
16	CAC-355-16	12.945	15.2	181.6	30.25	0.0055	2356.75
17	CAC-355-17	12.755	15.2	181.7	30.30	0.0055	2316.81
18	CAC-355-18	12.845	15.2	180.9	30.30	0.0055	2343.16
19	CAC-355-19	12.805	15.2	180.4	30.25	0.0055	2345.90
20	CAC-355-20	12.890	15.1	180.0	30.25	0.0054	2367.71
Promedio							2344.23

Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 58

Peso unitario endurecido del CAC-385

BRIQUETA	REGISTRO	PESO (kg)	Ø prom (cm)	AREA (cm2)	H prom (cm)	VOLUMEN (m3)	P.U (kg/m3)
1	CAC-385-1	12.670	15.2	181.2	30.30	0.0055	2307.43
2	CAC-385-2	12.995	15.2	180.9	30.30	0.0055	2370.52
3	CAC-385-3	12.775	15.2	181.8	30.15	0.0055	2331.22
4	CAC-385-4	12.705	15.2	180.9	30.25	0.0055	2321.45

5	CAC-385-5	12.965	15.2	181.7	30.25	0.0055	2358.84
6	CAC-385-6	12.720	15.2	181.1	30.20	0.0055	2325.74
7	CAC-385-7	12.753	15.2	181.7	30.21	0.0055	2323.25
8	CAC-385-8	12.755	15.2	181.3	30.20	0.0055	2329.07
9	CAC-385-9	12.815	15.2	181.9	30.20	0.0055	2332.34
10	CAC-385-10	12.865	15.2	182.3	30.15	0.0055	2340.71
11	CAC-385-11	12.805	15.2	181.2	30.15	0.0055	2344.39
12	CAC-385-12	12.720	15.2	180.7	30.30	0.0055	2322.65
13	CAC-385-13	12.775	15.2	181.9	30.25	0.0055	2321.22
14	CAC-385-14	12.840	15.2	182.4	30.25	0.0055	2327.67
15	CAC-385-15	12.875	15.2	181.7	30.30	0.0055	2338.60
16	CAC-385-16	12.705	15.2	181.2	30.21	0.0055	2321.46
17	CAC-385-17	12.965	15.2	180.7	30.20	0.0055	2375.22
18	CAC-385-18	12.720	15.2	181.9	30.20	0.0055	2315.05
19	CAC-385-19	12.753	15.2	182.4	30.15	0.0055	2319.48
20	CAC-385-20	12.815	15.2	181.7	30.15	0.0055	2339.28
Promedio							2333.28

Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 59

Peso unitario endurecido del CAC-420

BRIQUETA	REGISTRO	PESO (kg)	Ø prom (cm)	AREA (cm2)	H prom (cm)	VOLUMEN (m3)	P.U (kg/m3)
1	CAC-420-1	13.165	15.2	181.2	30.30	0.0055	2398.37
2	CAC-420-2	13.025	15.2	182.4	30.20	0.0055	2365.12
3	CAC-420-3	12.965	15.2	181.8	30.20	0.0055	2361.19
4	CAC-420-4	12.985	15.2	182.6	30.25	0.0055	2350.87
5	CAC-420-5	12.995	15.2	182.1	30.25	0.0055	2359.64
6	CAC-420-6	12.970	15.2	182.4	30.20	0.0055	2354.36
7	CAC-420-7	12.920	15.2	181.2	30.30	0.0055	2352.96
8	CAC-420-8	12.285	14.9	173.5	30.15	0.0052	2348.63
9	CAC-420-9	12.830	15.2	181.8	30.05	0.0055	2348.27
10	CAC-420-10	12.625	15.0	176.2	30.15	0.0053	2375.91
11	CAC-420-11	12.925	15.2	181.3	30.25	0.0055	2356.98
12	CAC-420-12	12.210	14.8	170.9	30.15	0.0052	2370.03
13	CAC-420-13	12.325	15.0	177.5	30.05	0.0053	2310.95
14	CAC-420-14	11.855	14.9	175.2	28.65	0.0050	2361.19
15	CAC-420-15	12.985	15.2	182.6	30.20	0.0055	2354.77
16	CAC-420-16	12.995	15.2	182.1	30.25	0.0055	2359.64
17	CAC-420-17	12.970	15.2	182.4	30.25	0.0055	2350.47
18	CAC-420-18	12.920	15.2	181.2	30.20	0.0055	2360.75
19	CAC-420-19	12.285	14.9	173.5	30.30	0.0053	2337.00
20	CAC-420-20	12.925	15.2	181.8	30.15	0.0055	2357.81
Promedio							2356.75

Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 60*Peso unitario endurecido del CAC -450 kg/m3*

BRIQUETA	REGISTRO	PESO (kg)	Ø prom (cm)	AREA (cm2)	H prom (cm)	VOLUMEN (m3)	P.U (kg/m3)
1	CAC-450-1	11.990	14.9	175.4	30.00	0.0053	2279.09
2	CAC-450-2	12.815	15.2	181.9	30.10	0.0055	2340.09
3	CAC-450-3	12.815	15.2	181.8	30.25	0.0055	2330.02
4	CAC-450-4	12.780	15.2	182.1	30.15	0.0055	2327.54
5	CAC-450-5	12.405	14.9	174.3	30.15	0.0053	2360.44
6	CAC-450-6	12.865	15.2	182.1	30.35	0.0055	2327.58
7	CAC-450-7	12.950	15.0	177.1	30.35	0.0054	2408.94
8	CAC-450-8	12.760	15.2	182.1	30.05	0.0055	2331.63
9	CAC-450-9	12.910	15.2	181.7	30.30	0.0055	2344.96
10	CAC-450-10	12.835	15.2	181.6	30.30	0.0055	2332.87
11	CAC-450-11	12.765	15.2	182.1	30.25	0.0055	2317.12
12	CAC-450-12	12.940	14.9	174.7	30.20	0.0053	2453.22
13	CAC-450-13	12.180	15.1	178.5	30.20	0.0054	2259.62
14	CAC-450-14	12.790	15.2	182.1	29.80	0.0054	2356.72
15	CAC-450-15	12.405	15.0	177.1	30.15	0.0053	2322.87
16	CAC-450-16	12.865	15.2	182.1	30.35	0.0055	2327.58
17	CAC-450-17	12.950	15.2	181.7	30.35	0.0055	2348.35
18	CAC-450-18	12.760	15.2	181.6	30.05	0.0055	2338.53
19	CAC-450-19	12.910	15.2	181.9	30.30	0.0055	2341.88
20	CAC-450-20	12.835	15.2	181.8	30.20	0.0055	2337.52
Promedio							2339.33

Nota. Fuente: Elaboración propia**Tabla 61***Peso unitario endurecido del CAC-470*

Briqueta	Registro	Peso (kg)	Ø Prom (cm)	Area (cm2)	H prom (cm)	Volumen (m3)	P.U (kg/m3)
1	CAC-470-1	12.985	15.2	180.7	30.25	0.0055	2374.96
2	CAC-470-2	13.045	15.2	181.6	30.10	0.0055	2386.01
3	CAC-470-3	12.785	15.2	180.4	30.30	0.0055	2339.14
4	CAC-470-4	12.990	15.2	181.7	30.15	0.0055	2371.23
5	CAC-470-5	12.980	15.1	180.0	30.25	0.0054	2384.25
6	CAC-470-6	12.970	15.2	181.9	30.30	0.0055	2353.54
7	CAC-470-7	12.860	15.2	182.2	30.30	0.0055	2329.75
8	CAC-470-8	12.870	15.3	182.8	30.15	0.0055	2335.48
9	CAC-470-9	12.825	15.2	181.6	30.20	0.0055	2338.00
10	CAC-470-10	13.005	15.3	182.9	30.20	0.0055	2354.53
11	CAC-470-11	12.870	15.2	182.5	30.23	0.0055	2333.51
12	CAC-470-12	12.985	15.3	183.8	30.25	0.0056	2335.53
13	CAC-470-13	12.825	15.3	183.9	30.05	0.0055	2321.35

14	CAC-470-14	12.860	15.3	184.0	30.20	0.0056	2314.61
15	CAC-470-15	12.970	15.1	180.0	30.15	0.0054	2390.31
16	CAC-470-16	12.860	15.2	181.9	30.25	0.0055	2337.43
17	CAC-470-17	12.870	15.2	182.2	30.30	0.0055	2331.56
18	CAC-470-18	12.825	15.3	182.8	30.30	0.0055	2315.80
19	CAC-470-19	13.005	15.2	181.6	30.15	0.0055	2374.75
20	CAC-470-20	12.870	15.2	181.7	30.20	0.0055	2345.43
Promedio							2348.36

Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 62

Peso unitario endurecido del CAC-500

BRIQUETA	REGISTRO	PESO (kg)	Ø prom (cm)	AREA (cm ²)	H prom (cm)	VOLUMEN (m ³)	P.U (kg/m ³)
1	CAC-500-1	12.925	15.2	182.0	30.15	0.0055	2355.49
2	CAC-500-2	12.960	15.2	181.2	30.25	0.0055	2364.92
3	CAC-500-3	13.040	15.3	182.8	30.30	0.0055	2354.62
4	CAC-500-4	12.990	15.2	182.4	30.15	0.0055	2361.90
5	CAC-500-5	12.580	15.1	178.9	30.05	0.0054	2340.04
6	CAC-500-6	13.000	15.2	181.9	30.20	0.0055	2366.01
7	CAC-500-7	13.035	15.3	183.3	30.30	0.0056	2347.56
8	CAC-500-8	12.975	15.2	181.9	30.15	0.0055	2366.16
9	CAC-500-9	12.990	15.3	182.8	30.25	0.0055	2348.70
10	CAC-500-10	13.045	15.2	181.3	30.30	0.0055	2374.16
11	CAC-500-11	13.010	15.2	181.3	30.30	0.0055	2367.79
12	CAC-500-12	13.015	15.3	183.0	30.25	0.0055	2351.68
13	CAC-500-13	12.950	15.2	182.4	30.25	0.0055	2346.85
14	CAC-500-14	11.550	14.9	175.2	28.25	0.0049	2333.80
15	CAC-500-15	13.035	15.1	178.9	30.30	0.0054	2404.67
16	CAC-500-16	12.975	15.2	181.9	30.15	0.0055	2365.38
17	CAC-500-17	12.990	15.3	183.3	30.25	0.0055	2343.32
18	CAC-500-18	13.045	15.2	181.9	30.30	0.0055	2367.15
19	CAC-500-19	13.010	15.3	182.8	30.30	0.0055	2348.43
20	CAC-500-20	12.950	15.2	181.3	30.25	0.0055	2360.77
Promedio							2358.47

Nota. Fuente: Elaboración propia

Resultados del Ensayo de Compresión del Concreto Autocompactante

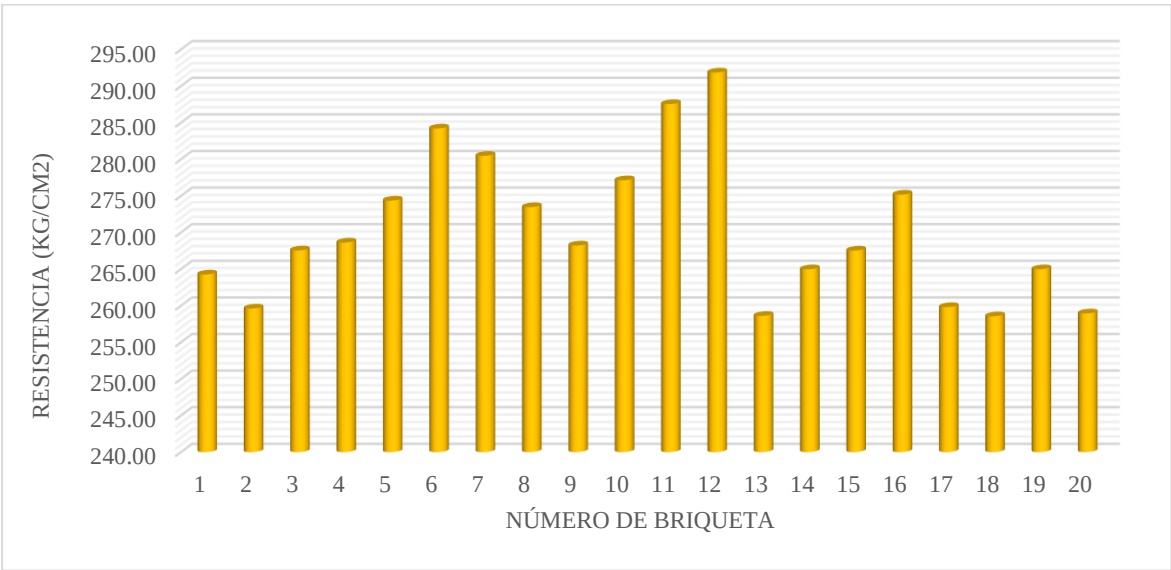
Los resultados obtenidos de las diferentes mezclas de concreto autocompactante se resumen en las siguientes tablas.

Tabla 63
Resistencia a la compresión del CAC-355

Briqueta	Tipo de Falla	Registro	Fecha de Fabricación	Edad (días)	Ø Prom (cm)	Área (cm2)	Carga (kg-f)	f'c (kg/cm2)
1	II	CAC-355-1	24/09/2024	28	15.2	181.0	47360	261.60
2	II	CAC-355-2	24/09/2024	28	15.2	182.1	54150	297.44
3	II	CAC-355-3	24/09/2024	28	15.2	182.2	46480	255.06
4	II	CAC-355-4	24/09/2024	28	15.2	181.2	47240	260.76
5	II	CAC-355-5	24/09/2024	28	15.2	182.1	53070	291.50
6	II	CAC-355-6	24/09/2024	28	15.2	182.1	44870	246.46
7	II	CAC-355-7	24/09/2024	28	15.2	181.3	52460	289.29
8	I	CAC-355-8	24/09/2024	28	15.2	181.6	50020	275.47
9	II	CAC-355-9	24/09/2024	28	15.2	181.7	46940	258.34
10	II	CAC-355-10	24/09/2024	28	15.2	181.5	48300	266.09
11	II	CAC-355-11	24/09/2024	28	15.2	181.0	49480	273.31
12	I	CAC-355-12	24/09/2024	28	15.2	181.3	47720	263.24
13	II	CAC-355-13	24/09/2024	28	15.2	181.8	54900	301.95
14	II	CAC-355-14	24/09/2024	28	15.3	183.0	53980	294.95
15	II	CAC-355-15	24/09/2024	28	15.2	181.0	50600	279.50
16	II	CAC-355-16	24/09/2024	28	15.2	181.6	48300	266.00
17	II	CAC-355-17	24/09/2024	28	15.2	181.7	49480	272.32
18	II	CAC-355-18	24/09/2024	28	15.2	180.9	47720	263.76
19	II	CAC-355-19	24/09/2024	28	15.2	180.4	54900	304.25
20	II	CAC-355-20	24/09/2024	28	15.1	180.0	47240	262.49

Nota. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 1
Resistencia a la compresión obtenida a los 28 días del CAC-355



Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 64

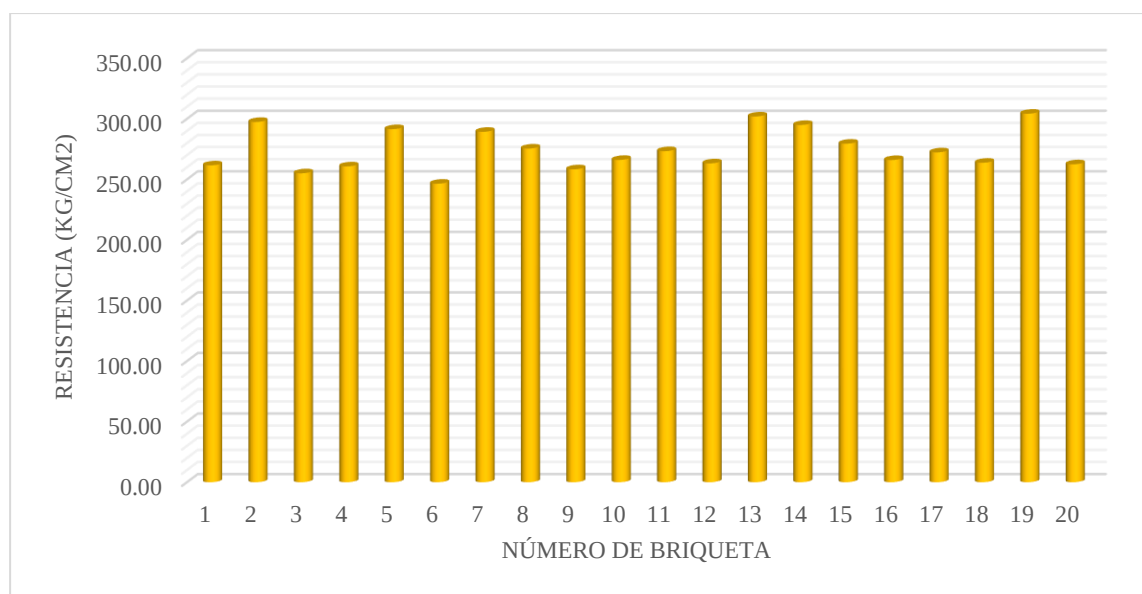
Resistencia a la compresión del CAC-385

Briqueta	Tipo de Falla	Registro	Fecha de Fabricación	Edad (días)	Ø Prom (cm)	Área (cm ²)	Carga (kg-f)	f'c (kg/cm ²)
1	I	CAC-385-1	23/09/2024	28	15.2	181.2	47890	264.26
2	II	CAC-385-2	23/09/2024	28	15.2	180.9	46970	259.62
3	II	CAC-385-3	23/09/2024	28	15.2	181.8	48630	267.56
4	I	CAC-385-4	23/09/2024	28	15.2	180.9	48600	268.62
5	II	CAC-385-5	23/09/2024	28	15.2	181.7	49850	274.36
6	II	CAC-385-6	23/09/2024	28	15.2	181.1	51470	284.21
7	I	CAC-385-7	23/09/2024	28	15.2	181.7	50960	280.47
8	II	CAC-385-8	23/09/2024	28	15.2	181.3	49590	273.47
9	II	CAC-385-9	23/09/2024	28	15.2	181.9	48800	268.23
10	I	CAC-385-10	23/09/2024	28	15.2	182.3	50520	277.13
11	II	CAC-385-11	23/09/2024	28	15.2	181.2	52090	287.54
12	II	CAC-385-12	23/09/2024	28	15.2	180.7	52750	291.85
13	II	CAC-385-13	23/09/2024	28	15.2	181.9	47050	258.61
14	II	CAC-385-14	23/09/2024	28	15.2	182.4	48320	264.98
15	III	CAC-385-15	23/09/2024	28	15.2	181.7	48610	267.53
16	II	CAC-385-16	23/09/2024	28	15.2	181.2	49850	275.17
17	II	CAC-385-17	23/09/2024	28	15.2	180.7	46960	259.82
18	II	CAC-385-18	23/09/2024	28	15.2	181.9	47040	258.55
19	II	CAC-385-19	23/09/2024	28	15.2	182.4	48320	264.98
20	II	CAC-385-20	23/09/2024	28	15.2	181.7	47050	258.95

Nota. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 2

Resistencia a la compresión obtenida a los 28 días del CAC-385



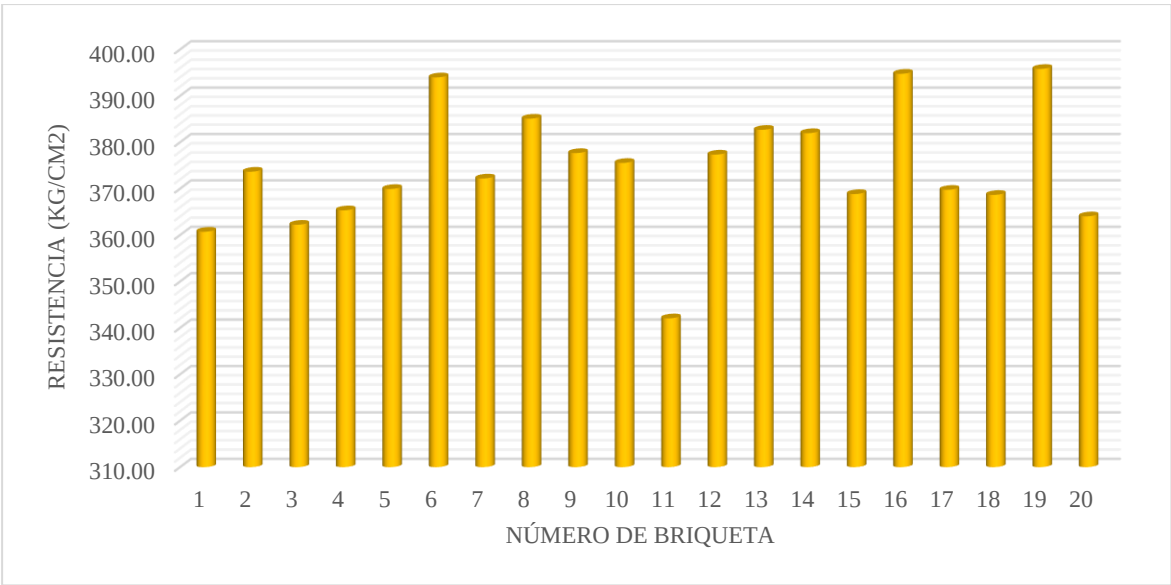
Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 65
Resistencia a la compresión del CAC-420

Briqueta	Tipo de Falla	Registro	Fecha de Fabricación	Edad (días)	Ø Prom (cm)	Área (cm2)	Carga (kg-f)	f'c (kg/cm2)
1	II	CAC-420-1	04/09/2024	28	15.2	181.2	65350	360.73
2	II	CAC-420-2	04/09/2024	28	15.2	182.4	68140	373.67
3	II	CAC-420-3	04/09/2024	28	15.2	181.8	65860	362.23
4	II	CAC-420-4	04/09/2024	28	15.2	182.6	66710	365.35
5	II	CAC-420-5	04/09/2024	28	15.2	182.1	67350	369.94
6	II	CAC-420-6	04/09/2024	28	15.2	182.4	71870	393.99
7	II	CAC-420-7	04/09/2024	28	15.2	181.2	67450	372.20
8	II	CAC-420-8	04/09/2024	28	14.9	173.5	66810	385.09
9	II	CAC-420-9	04/09/2024	28	15.2	181.8	68670	377.69
10	II	CAC-420-10	04/09/2024	28	15.0	176.2	66190	375.56
11	II	CAC-420-11	04/09/2024	28	15.2	181.3	62010	342.07
12	II	CAC-420-12	04/09/2024	28	14.8	170.9	64480	377.36
13	II	CAC-420-13	04/09/2024	28	15.0	177.5	67920	382.69
14	III	CAC-420-14	04/09/2024	28	14.9	175.2	66940	381.98
15	II	CAC-420-15	04/09/2024	28	15.2	182.6	67350	368.85
16	II	CAC-420-16	04/09/2024	28	15.2	182.1	71870	394.77
17	II	CAC-420-17	04/09/2024	28	15.2	182.4	67450	369.76
18	II	CAC-420-18	04/09/2024	28	15.2	181.2	66810	368.67
19	II	CAC-420-19	04/09/2024	28	14.9	173.5	68670	395.82
20	II	CAC-420-20	04/09/2024	28	15.2	181.8	66190	364.05

Nota. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3
Resistencia a la compresión obtenida a los 28 días del CAC-420



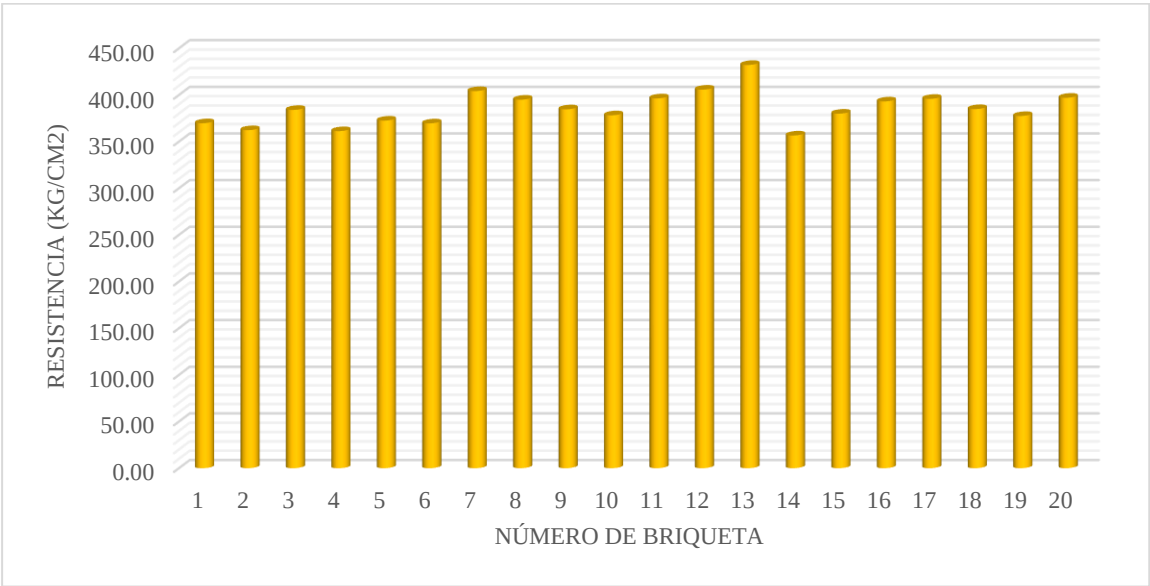
Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 66
Resistencia a la compresión del CAC-450

Briqueta	Tipo de Falla	Registro	Fecha de Fabricación	Edad (días)	Ø Prom (cm)	Área (cm2)	Carga (kg-f)	f'c (kg/cm2)
1	II	CAC-450-1	05/09/2024	28	14.9	175.4	64840	369.75
2	II	CAC-450-2	05/09/2024	28	15.2	181.9	65920	362.32
3	II	CAC-450-3	05/09/2024	28	15.2	181.8	69820	384.01
4	II	CAC-450-4	05/09/2024	28	15.2	182.1	65790	361.25
5	II	CAC-450-5	05/09/2024	28	14.9	174.3	64940	372.56
6	II	CAC-450-6	05/09/2024	28	15.2	182.1	67310	369.60
7	II	CAC-450-7	05/09/2024	28	15.0	177.1	71590	404.17
8	II	CAC-450-8	05/09/2024	28	15.2	182.1	71930	394.97
9	II	CAC-450-9	05/09/2024	28	15.2	181.7	69890	384.65
10	II	CAC-450-10	05/09/2024	28	15.2	181.6	68680	378.24
11	II	CAC-450-11	05/09/2024	28	15.2	182.1	72190	396.40
12	II	CAC-450-12	05/09/2024	28	14.9	174.7	70870	405.76
13	II	CAC-450-13	05/09/2024	28	15.1	178.5	77140	432.19
14	II	CAC-450-14	05/09/2024	28	15.2	182.1	64940	356.59
15	II	CAC-450-15	05/09/2024	28	15.0	177.1	67310	380.01
16	II	CAC-450-16	05/09/2024	28	15.2	182.1	71590	393.10
17	II	CAC-450-17	05/09/2024	28	15.2	181.7	71930	395.88
18	II	CAC-450-18	05/09/2024	28	15.2	181.6	69890	384.90
19	II	CAC-450-19	05/09/2024	28	15.2	181.9	68680	377.49
20	II	CAC-450-20	05/09/2024	28	15.2	181.8	72190	397.05

Nota. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 4
Resistencia a la compresión obtenida a los 28 días del CAC-450



Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 67

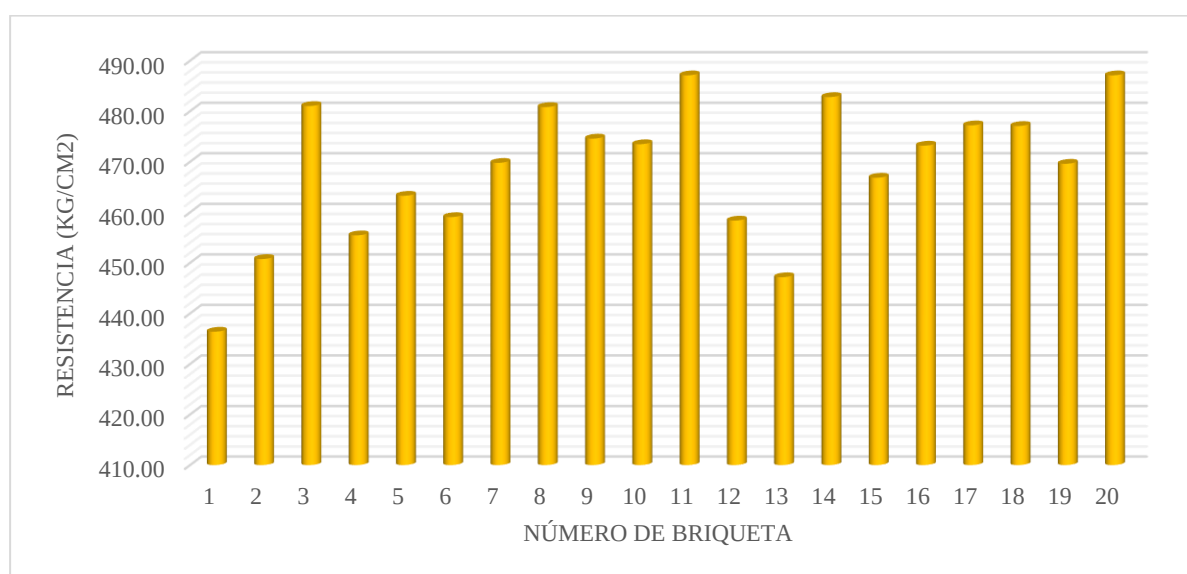
Resistencia a la compresión del CAC-470

Briqueta	Tipo de Falla	Registro	Fecha de Fabricación	Edad (días)	Ø Prom (cm)	Área (cm ²)	Carga (kg-f)	f'c (kg/cm ²)
1	II	CAC-470-1	09/09/2024	28	15.2	182.0	79420	436.38
2	III	CAC-470-2	09/09/2024	28	15.2	181.2	81660	450.76
3	II	CAC-470-3	09/09/2024	28	15.3	182.8	87920	481.03
4	II	CAC-470-4	09/09/2024	28	15.2	182.4	83080	455.45
5	II	CAC-470-5	09/09/2024	28	15.1	178.9	82880	463.27
6	II	CAC-470-6	09/09/2024	28	15.2	181.9	83520	459.06
7	II	CAC-470-7	09/09/2024	28	15.3	183.3	86090	469.79
8	II	CAC-470-8	09/09/2024	28	15.2	181.9	87450	480.82
9	II	CAC-470-9	09/09/2024	28	15.3	182.8	86770	474.58
10	II	CAC-470-10	09/09/2024	28	15.2	181.3	85860	473.48
11	II	CAC-470-11	09/09/2024	28	15.2	181.3	88330	487.10
12	V	CAC-470-12	09/09/2024	28	15.3	183.0	83860	458.37
13	I	CAC-470-13	09/09/2024	28	15.2	182.4	81570	447.17
14	II	CAC-470-14	09/09/2024	28	14.9	175.2	84580	482.80
15	II	CAC-470-15	09/09/2024	28	15.1	178.9	83520	466.85
16	III	CAC-470-16	09/09/2024	28	15.2	181.9	86090	473.19
17	I	CAC-470-17	09/09/2024	28	15.3	183.3	87450	477.21
18	II	CAC-470-18	09/09/2024	28	15.2	181.9	86770	477.08
19	II	CAC-470-19	09/09/2024	28	15.3	182.8	85860	469.61
20	II	CAC-470-20	09/09/2024	28	15.2	181.3	88330	487.10

Nota. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 5

Resistencia a la compresión obtenida a los 28 días del CAC-470



Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 68

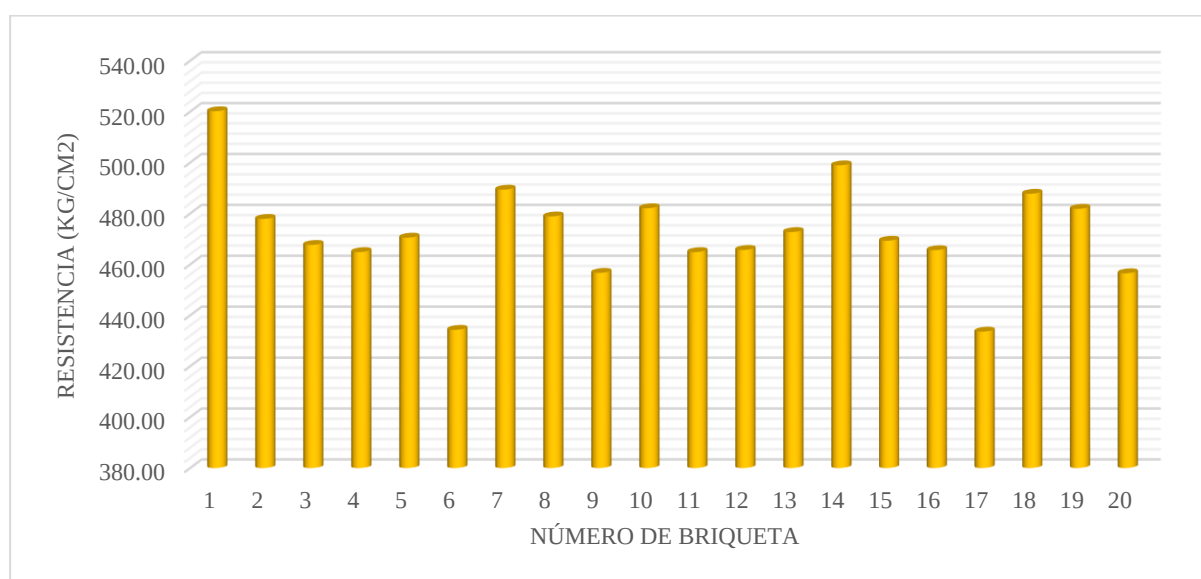
Resistencia a la compresión del CAC-500

Briqueta	Tipo de Falla	Registro	Fecha de Fabricación	Edad (días)	Ø Prom (cm)	Área (cm ²)	Carga (kg-f)	f'c (kg/cm ²)
1	II	CAC-500-1	11/09/2024	28	15.2	180.7	94020	520.19
2	I	CAC-500-2	11/09/2024	28	15.2	181.6	86800	477.87
3	I	CAC-500-3	11/09/2024	28	15.2	180.4	84360	467.66
4	II	CAC-500-4	11/09/2024	28	15.2	181.7	84460	464.84
5	II	CAC-500-5	11/09/2024	28	15.1	180.0	84680	470.52
6	II	CAC-500-6	11/09/2024	28	15.2	181.9	78990	434.31
7	I	CAC-500-7	11/09/2024	28	15.2	182.2	89150	489.36
8	II	CAC-500-8	11/09/2024	28	15.3	182.8	87520	478.84
9	II	CAC-500-9	11/09/2024	28	15.2	181.6	82950	456.68
10	II	CAC-500-10	11/09/2024	28	15.3	182.9	88170	482.08
11	II	CAC-500-11	11/09/2024	28	15.2	182.5	84820	464.83
12	II	CAC-500-12	11/09/2024	28	15.3	183.8	85590	465.68
13	II	CAC-500-13	11/09/2024	28	15.3	183.9	86910	472.71
14	II	CAC-500-14	11/09/2024	28	15.3	184.0	91790	498.93
15	I	CAC-500-15	11/09/2024	28	15.1	180.0	84460	469.30
16	II	CAC-500-16	11/09/2024	28	15.2	181.9	84680	465.59
17	II	CAC-500-17	11/09/2024	28	15.2	182.2	78990	433.59
18	I	CAC-500-18	11/09/2024	28	15.3	182.8	89150	487.76
19	II	CAC-500-19	11/09/2024	28	15.2	181.6	87520	481.84
20	II	CAC-500-20	11/09/2024	28	15.2	181.7	82950	456.53

Nota. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 6

Resistencia a la compresión obtenida a los 28 días del CAC-500



Nota. Fuente: Elaboración propia

Resultados del Módulo de Elasticidad del Concreto autocompactante.

Los resultados obtenidos del módulo de elasticidad del concreto autocompactante se resumen en las siguientes tablas.

Tabla 69

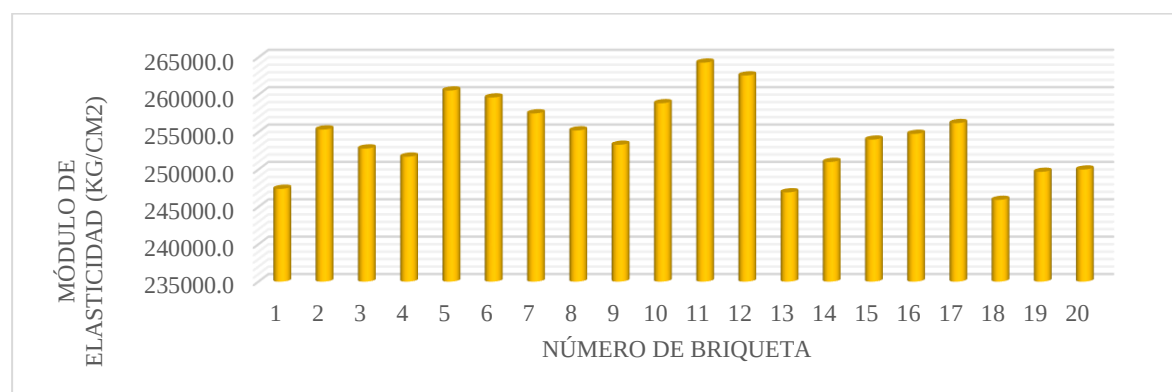
Módulo de elasticidad del CAC-355

Briqueta	Registro	f'c (kg/cm2)	f'c (Mpa)	P.U (kg/m3)	$Ec = wc^{1.5} \times 0.043\sqrt{f'c}$	Ec (kg/cm2)
1	CAC-355-1	264.26	25.92	2307.43	24262.8	247412.9
2	CAC-355-2	259.62	25.46	2370.52	25041.4	255352.3
3	CAC-355-3	267.56	26.24	2331.22	24791.9	252807.6
4	CAC-355-4	268.62	26.34	2321.45	24685.4	251721.9
5	CAC-355-5	274.36	26.91	2358.84	25552.6	260565.2
6	CAC-355-6	284.21	27.87	2325.74	25461.7	259637.9
7	CAC-355-7	280.47	27.50	2323.25	25253.0	257510.4
8	CAC-355-8	273.47	26.82	2329.07	25029.6	255231.6
9	CAC-355-9	268.23	26.30	2332.34	24840.9	253307.9
10	CAC-355-10	277.13	27.18	2340.71	25386.0	258866.3
11	CAC-355-11	287.54	28.20	2344.39	25919.1	264302.0
12	CAC-355-12	291.85	28.62	2322.65	25750.4	262582.4
13	CAC-355-13	258.61	25.36	2321.22	24217.2	246947.4
14	CAC-355-14	264.98	25.99	2327.67	24616.0	251014.0
15	CAC-355-15	267.53	26.24	2338.60	24908.7	253999.5
16	CAC-355-16	275.17	26.99	2321.46	24984.6	254772.9
17	CAC-355-17	259.82	25.48	2375.22	25125.8	256212.3
18	CAC-355-18	258.55	25.36	2315.05	24118.2	245937.8
19	CAC-355-19	264.98	25.99	2319.48	24486.1	249689.7
20	CAC-355-20	258.95	25.39	2339.28	24516.5	249999.9

Nota. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 7

Módulo de elasticidad obtenida a los 28 días del CAC-355



Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 70

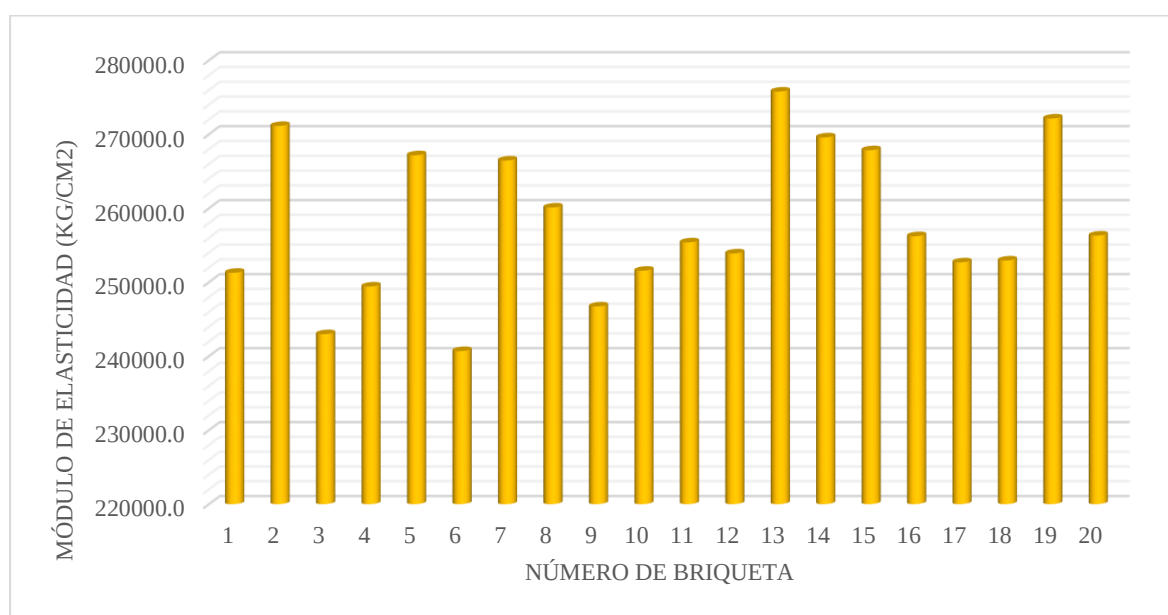
Módulo de elasticidad del CAC-385

Briqueta	Registro	f'c (kg/cm2)	f'c (Mpa)	P.U (kg/m3)	$Ec = wc^{1.5} \times 0.043 \sqrt{f'c}$	Ec (kg/cm2)
1	CAC-385-1	261.60	25.65	2339.31	24642.1	251280.1
2	CAC-385-2	297.44	29.17	2357.83	26588.5	271128.3
3	CAC-385-3	255.06	25.01	2306.88	23827.8	242976.5
4	CAC-385-4	260.76	25.57	2330.25	24460.0	249423.9
5	CAC-385-5	291.50	28.59	2350.56	26200.5	267171.6
6	CAC-385-6	246.46	24.17	2318.79	23604.6	240700.5
7	CAC-385-7	289.29	28.37	2352.32	26130.2	266454.6
8	CAC-385-8	275.47	27.01	2352.86	25507.3	260102.9
9	CAC-385-9	258.34	25.33	2320.63	24195.6	246727.3
10	CAC-385-10	266.09	26.09	2327.77	24669.1	251555.8
11	CAC-385-11	273.31	26.80	2330.47	25045.1	255389.5
12	CAC-385-12	263.24	25.82	2350.60	24898.5	253895.2
13	CAC-385-13	301.95	29.61	2372.75	27044.3	275775.7
14	CAC-385-14	294.95	28.92	2355.42	26436.7	269579.9
15	CAC-385-15	279.50	27.41	2387.78	26266.7	267847.1
16	CAC-385-16	266.00	26.09	2356.75	25127.1	256225.8
17	CAC-385-17	272.32	26.71	2316.81	24780.1	252688.1
18	CAC-385-18	263.76	25.87	2343.16	24804.8	252939.4
19	CAC-385-19	304.25	29.84	2345.90	26687.4	272136.7
20	CAC-385-20	262.49	25.74	2367.71	25135.0	256306.5

Nota. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 8

Módulo de elasticidad obtenida a los 28 días del CAC-385



Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 71

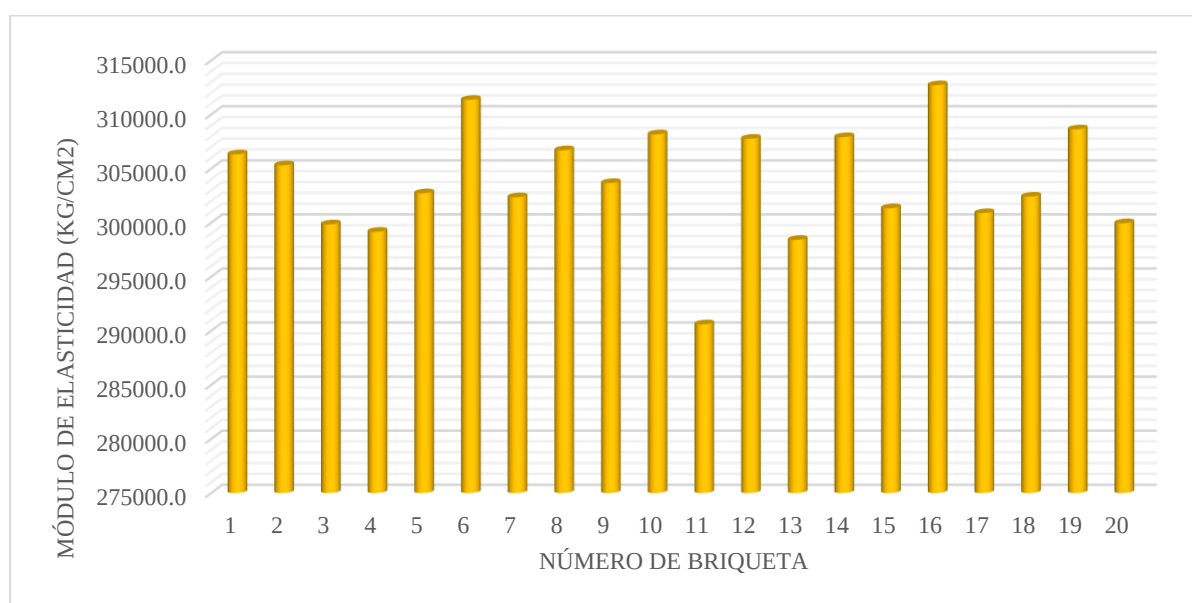
Módulo de elasticidad del CAC-420

Briqueta	Registro	f'c (kg/cm2)	f'c (Mpa)	P.U (kg/m3)	$E_c = w c^{1.5} \times 0.043 \sqrt{f'c}$	E_c (kg/cm2)
1	CAC-420-1	360.73	35.38	2398.37	30039.6	306319.7
2	CAC-420-2	373.67	36.64	2365.12	29940.0	305303.9
3	CAC-420-3	362.23	35.52	2361.19	29404.9	299848.1
4	CAC-420-4	365.35	35.83	2350.87	29337.6	299161.5
5	CAC-420-5	369.94	36.28	2359.64	29686.9	302723.3
6	CAC-420-6	393.99	38.64	2354.36	30533.9	311360.5
7	CAC-420-7	372.20	36.50	2352.96	29651.0	302356.8
8	CAC-420-8	385.09	37.76	2348.63	30077.0	306700.9
9	CAC-420-9	377.69	37.04	2348.27	29779.5	303667.9
10	CAC-420-10	375.56	36.83	2375.91	30221.4	308173.3
11	CAC-420-11	342.07	33.55	2356.98	28498.4	290604.0
12	CAC-420-12	377.36	37.01	2370.03	30181.2	307763.4
13	CAC-420-13	382.69	37.53	2310.95	29264.2	298412.9
14	CAC-420-14	381.98	37.46	2361.19	30195.7	307912.0
15	CAC-420-15	368.85	36.17	2354.77	29551.2	301340.0
16	CAC-420-16	394.77	38.71	2359.64	30666.9	312716.6
17	CAC-420-17	369.76	36.26	2350.47	29506.8	300886.7
18	CAC-420-18	368.67	36.15	2360.75	29656.6	302414.7
19	CAC-420-19	395.82	38.82	2337.00	30266.6	308634.7
20	CAC-420-20	364.05	35.70	2357.81	29415.2	299953.0

Nota. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 9

Módulo de elasticidad obtenida a los 28 días del CAC-420



Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 72

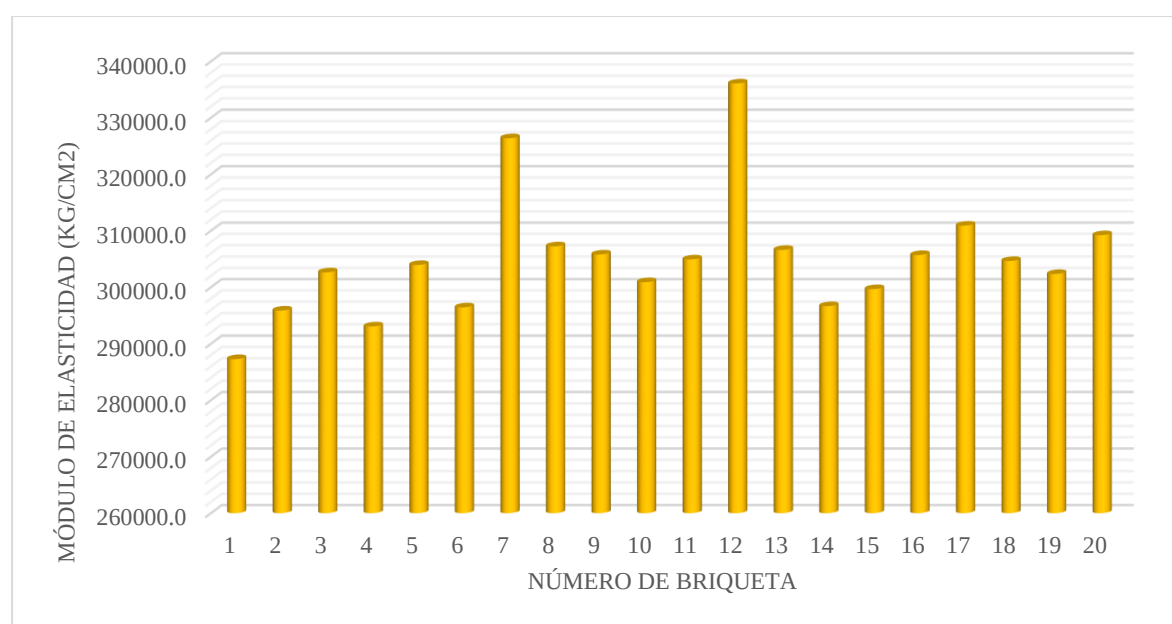
Módulo de elasticidad del CAC-450

Briqueta	Registro	f'c (kg/cm2)	f'c (Mpa)	P.U (kg/m3)	$Ec = wc^{1.5} \times 0.043 \sqrt{f'c}$	Ec (kg/cm2)
1	CAC-450-1	369.75	36.26	2279.09	28172.4	287279.9
2	CAC-450-2	362.32	35.53	2340.09	29015.3	295874.9
3	CAC-450-3	384.01	37.66	2330.02	29678.4	302636.9
4	CAC-450-4	361.25	35.43	2327.54	28739.5	293062.9
5	CAC-450-5	372.56	36.54	2360.44	29806.8	303946.2
6	CAC-450-6	369.60	36.25	2327.58	29070.4	296436.7
7	CAC-450-7	404.17	39.64	2408.94	32007.5	326386.5
8	CAC-450-8	394.97	38.73	2331.63	30130.0	307241.5
9	CAC-450-9	384.65	37.72	2344.96	29989.2	305806.0
10	CAC-450-10	378.24	37.09	2332.87	29508.6	300904.9
11	CAC-450-11	396.40	38.87	2317.12	29903.1	304927.9
12	CAC-450-12	405.76	39.79	2453.22	32958.7	336086.0
13	CAC-450-13	432.19	42.38	2259.62	30069.1	306620.4
14	CAC-450-14	356.59	34.97	2356.72	29091.9	296656.0
15	CAC-450-15	380.01	37.27	2322.87	29387.5	299670.1
16	CAC-450-16	393.10	38.55	2327.58	29980.4	305716.1
17	CAC-450-17	395.88	38.82	2348.35	30489.7	310910.0
18	CAC-450-18	384.90	37.75	2338.53	29875.8	304649.9
19	CAC-450-19	377.49	37.02	2341.88	29650.4	302351.4
20	CAC-450-20	397.05	38.94	2337.52	30323.8	309217.5

Nota. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 10

Módulo de elasticidad obtenida a los 28 días del CAC-450



Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 73

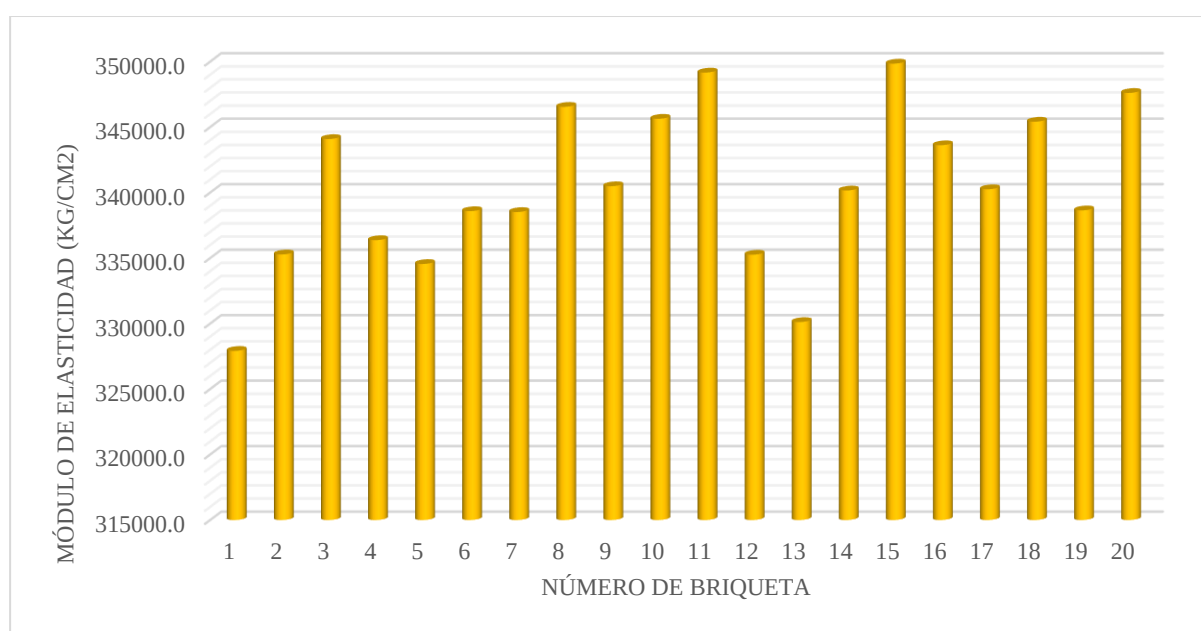
Módulo de elasticidad del CAC-470

Briqueta	Registro	f'c (kg/cm2)	f'c (Mpa)	P.U (kg/m3)	$Ec = wc^{1.5} \times 0.043\sqrt{f'c}$	Ec (kg/cm2)
1	CAC-470-1	436.38	42.79	2355.49	32157.7	327918.4
2	CAC-470-2	450.76	44.20	2364.92	32879.7	335281.0
3	CAC-470-3	481.03	47.17	2354.62	33744.0	344094.2
4	CAC-470-4	455.45	44.66	2361.90	32986.8	336373.0
5	CAC-470-5	463.27	45.43	2340.04	32808.3	334552.6
6	CAC-470-6	459.06	45.02	2366.01	33204.0	338587.7
7	CAC-470-7	469.79	46.07	2347.56	33197.3	338519.8
8	CAC-470-8	480.82	47.15	2366.16	33984.9	346550.6
9	CAC-470-9	474.58	46.54	2348.70	33390.7	340492.0
10	CAC-470-10	473.48	46.43	2374.16	33895.6	345640.6
11	CAC-470-11	487.10	47.77	2367.79	34241.5	349167.1
12	CAC-470-12	458.37	44.95	2351.68	32877.7	335260.9
13	CAC-470-13	447.17	43.85	2346.85	32373.6	330120.1
14	CAC-470-14	482.80	47.35	2333.80	33358.6	340163.9
15	CAC-470-15	466.85	45.78	2404.67	34308.5	349851.0
16	CAC-470-16	473.19	46.40	2365.38	33697.4	343619.5
17	CAC-470-17	477.21	46.80	2343.32	33368.0	340259.8
18	CAC-470-18	477.08	46.79	2367.15	33873.7	345417.0
19	CAC-470-19	469.61	46.05	2348.43	33209.5	338644.4
20	CAC-470-20	487.10	47.77	2360.77	34089.2	347614.5

Nota. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 11

Módulo de elasticidad obtenida a los 28 días del CAC-470



Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 74

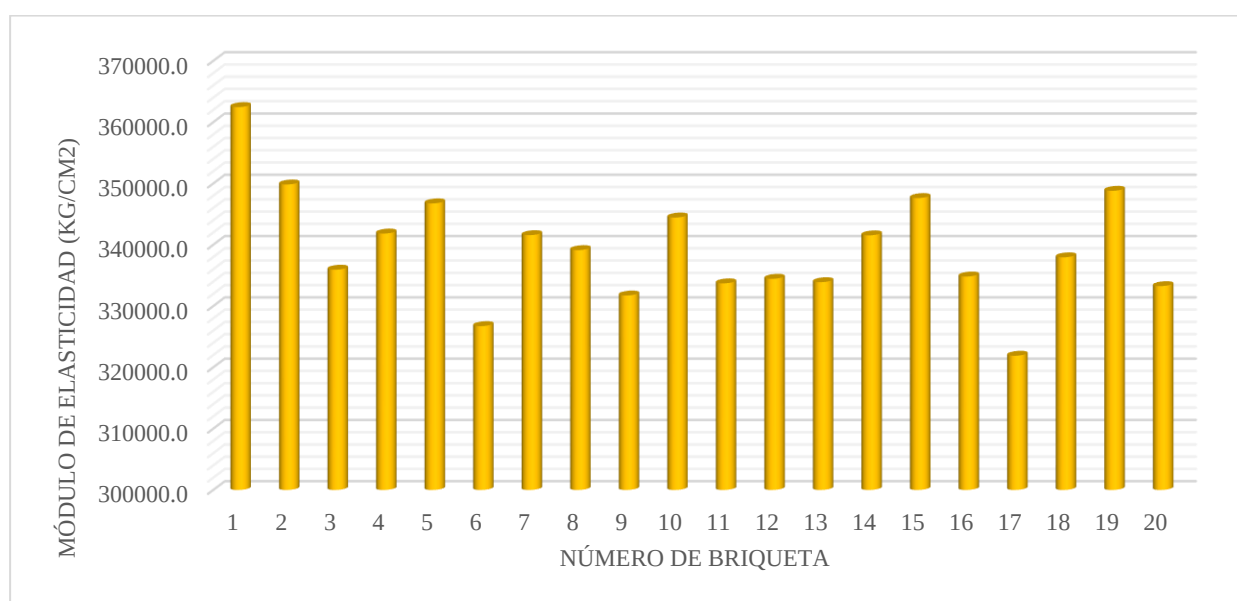
Módulo de elasticidad del CAC-500

Briqueta	Registro	f'c (kg/cm2)	f'c (Mpa)	P.U (kg/m3)	$Ec = wc^{1.5} \times 0.043 \sqrt{f'c}$	Ec (kg/cm2)
1	CAC-500-1	520.19	51.01	2374.96	35546.1	362470.5
2	CAC-500-2	477.87	46.86	2386.01	34307.9	349844.4
3	CAC-500-3	467.66	45.86	2339.14	32944.3	335939.9
4	CAC-500-4	464.84	45.59	2371.23	33522.8	341838.8
5	CAC-500-5	470.52	46.14	2384.25	34005.3	346759.0
6	CAC-500-6	434.31	42.59	2353.54	32041.1	326729.8
7	CAC-500-7	489.36	47.99	2329.75	33497.1	341576.9
8	CAC-500-8	478.84	46.96	2335.48	33257.6	339134.2
9	CAC-500-9	456.68	44.78	2338.00	32531.3	331728.3
10	CAC-500-10	482.08	47.28	2354.53	33779.0	344450.9
11	CAC-500-11	464.83	45.58	2333.51	32725.9	333712.6
12	CAC-500-12	465.68	45.67	2335.53	32798.5	334452.5
13	CAC-500-13	472.71	46.36	2321.35	32744.4	333901.6
14	CAC-500-14	498.93	48.93	2314.61	33493.8	341543.0
15	CAC-500-15	469.30	46.02	2390.31	34090.8	347630.5
16	CAC-500-16	465.59	45.66	2337.43	32835.2	334827.0
17	CAC-500-17	433.59	42.52	2331.56	31567.4	321899.5
18	CAC-500-18	487.76	47.83	2315.80	33142.3	337958.9
19	CAC-500-19	481.84	47.25	2374.75	34206.3	348808.4
20	CAC-500-20	456.53	44.77	2345.43	32681.2	333256.6

Nota. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 12

Módulo de elasticidad obtenida a los 28 días del CAC-500



Nota. Fuente: Elaboración propia

Resultados del Ensayo de Flexión del Concreto autocompactante

Los resultados obtenidos en el ensayo de flexión (módulo de rotura) de los diferentes diseños de mezcla se muestran en las siguientes tablas.

Tabla 75

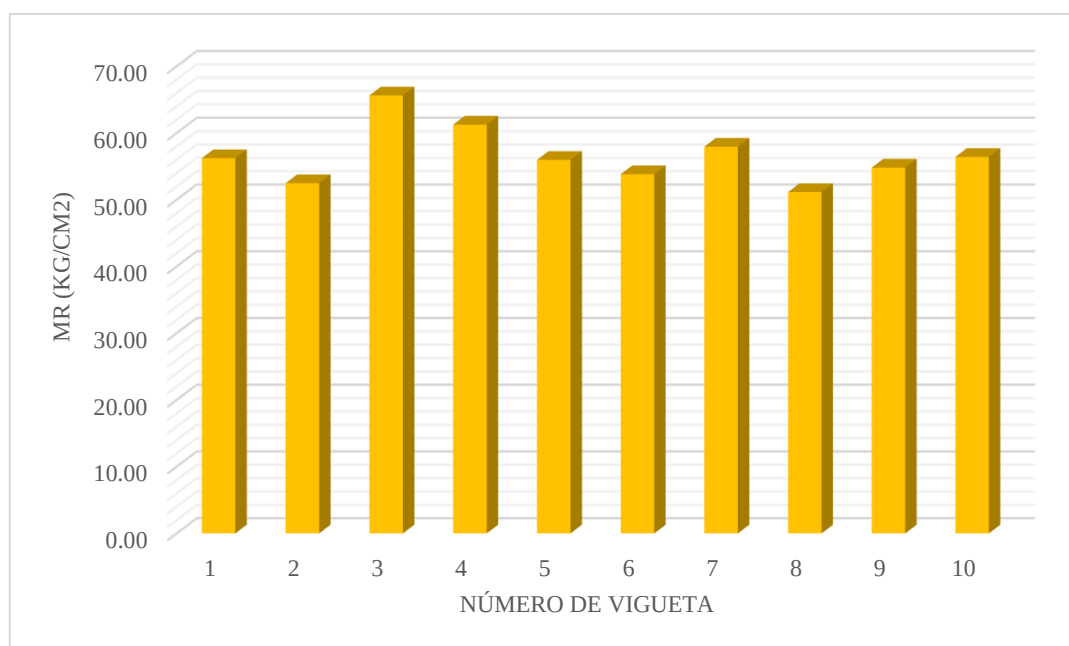
Módulo de rotura del CAC-355

Vigueta	Registro	Edad (días)	L Prom (cm)	A Prom (cm)	H Prom (cm)	Carga (kg-f)	Módulo de Rotura (kg/cm ²)
1	CAC-355-1	28	59.7	14.9	15.0	3169.2	56.22
2	CAC-355-2	28	59.7	15.0	15.0	2958.1	52.48
3	CAC-355-3	28	59.7	15.0	15.0	3728.3	65.62
4	CAC-355-4	28	59.7	15.0	15.0	3429.7	61.25
5	CAC-355-5	28	59.7	15.0	15.0	3164.0	55.97
6	CAC-355-6	28	59.7	14.9	15.0	3007.3	53.82
7	CAC-355-7	28	59.7	15.0	15.0	3244.2	57.94
8	CAC-355-8	28	59.7	15.0	15.0	2906.9	51.14
9	CAC-355-9	28	59.7	15.0	15.0	3077.8	54.81
10	CAC-355-10	28	59.7	15.0	15.0	3190.2	56.41

Nota. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 13

Módulo de rotura obtenida a los 28 días del CAC-355



Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 76

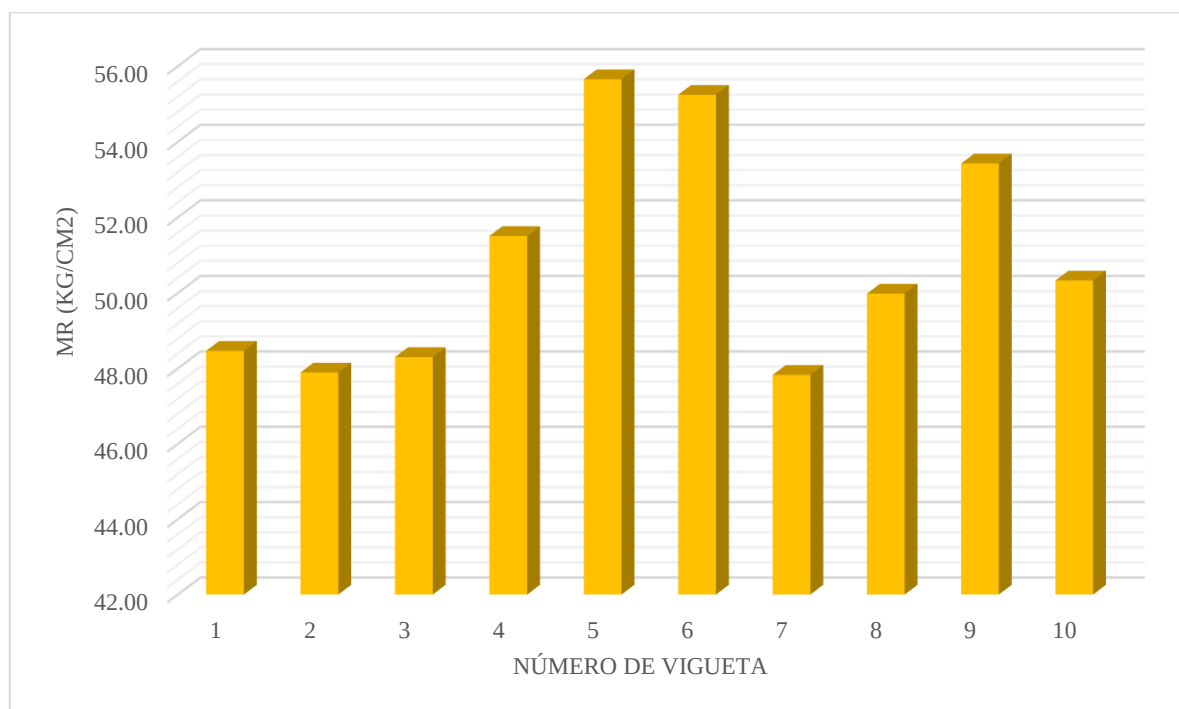
Módulo de rotura del CAC-385

Vigueta	Registro	Edad (días)	L Prom (cm)	A Prom (cm)	H Prom (cm)	Carga (kg-f)	Módulo de Rotura (kg/cm2)
1	CAC-385-1	28	59.7	15.0	15.0	2740.0	48.47
2	CAC-385-2	28	59.7	14.9	15.0	2685.0	47.89
3	CAC-385-3	28	59.7	15.0	15.0	2704.6	48.30
4	CAC-385-4	28	59.7	15.0	15.1	2937.5	51.51
5	CAC-385-5	28	59.7	15.0	15.0	3162.1	55.66
6	CAC-385-6	28	59.7	14.9	15.0	3113.9	55.24
7	CAC-385-7	28	59.7	15.0	15.0	2696.1	47.83
8	CAC-385-8	28	59.7	15.0	15.0	2821.0	49.98
9	CAC-385-9	28	59.7	15.0	15.0	2991.6	53.43
10	CAC-385-10	28	59.7	15.0	15.0	2826.4	50.33

Nota. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 14

Módulo de rotura obtenida a los 28 días del CAC-385



Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 77

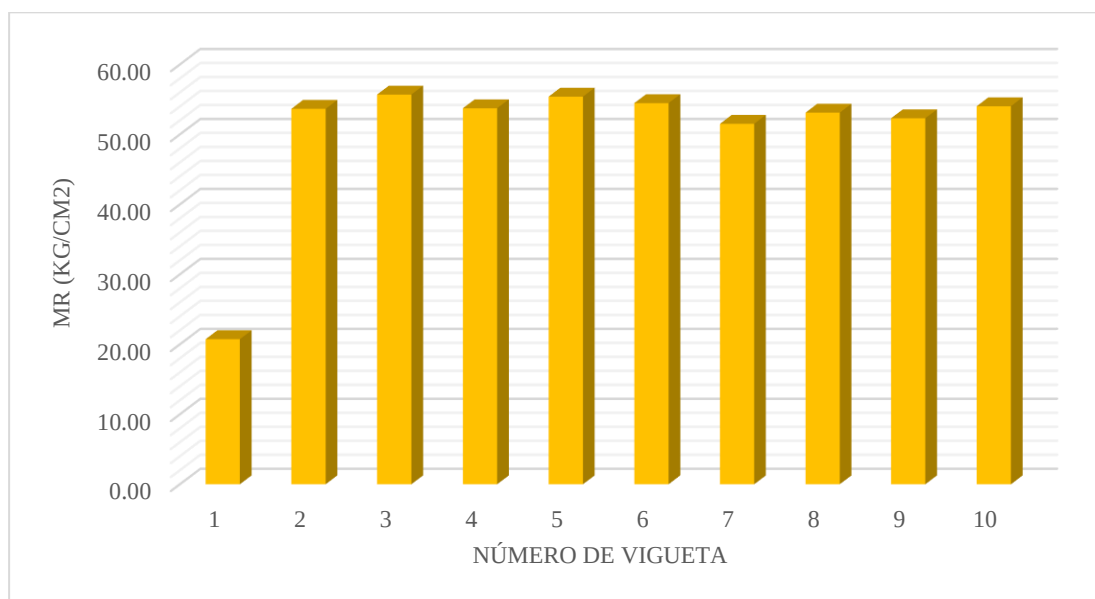
Módulo de rotura del CAC-420

Vigueta	Registro	Edad (días)	L Prom (cm)	A Prom (cm)	H Prom (cm)	Carga (kg-f)	Módulo de Rotura (kg/cm ²)
1	CAC-420-1	28	59.7	15.0	15.0	1172.3	20.74
2	CAC-420-2	28	59.7	14.9	15.0	2998.5	53.66
3	CAC-420-3	28	59.7	15.0	15.0	3118.7	55.70
4	CAC-420-4	28	59.7	15.0	15.1	3064.9	53.74
5	CAC-420-5	28	59.7	15.0	15.0	3147.9	55.41
6	CAC-420-6	28	59.7	15.0	15.1	3106.9	54.48
7	CAC-420-7	28	59.7	15.0	15.0	2927.2	51.52
8	CAC-420-8	28	59.7	14.9	15.0	2993.9	53.11
9	CAC-420-9	28	59.7	15.0	15.0	2948.7	52.31
10	CAC-420-10	28	59.7	15.0	15.0	3049.4	54.03

Nota. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 15

Módulo de rotura obtenida a los 28 días del CAC-420



Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 78*Módulo de rotura del CAC-450*

Vigueta	Registro	Edad (días)	L Prom (cm)	A Prom (cm)	H Prom (cm)	Carga (kg-f)	Módulo de Rotura (kg/cm ²)
1	CAC-450-1	28	59.7	15.0	15.0	3211.8	57.36
2	CAC-450-2	28	59.7	15.0	15.1	3117.1	54.66
3	CAC-450-3	28	59.7	15.0	15.0	3131.4	55.11
4	CAC-450-4	28	59.7	15.0	15.1	3298.1	57.83
5	CAC-450-5	28	59.7	15.0	15.0	4420.0	77.80
6	CAC-450-6	28	59.7	14.9	15.0	3147.0	55.83
7	CAC-450-7	28	59.7	15.0	15.0	3266.9	57.96
8	CAC-450-8	28	59.7	15.0	15.0	3162.3	55.66
9	CAC-450-9	28	59.7	15.0	15.0	3072.1	54.87
10	CAC-450-10	28	59.7	15.0	15.0	3150.7	56.11

Nota. Fuente: Elaboración propia**Gráfica 16**

Módulo de rotura obtenida a los 28 días del CAC-450

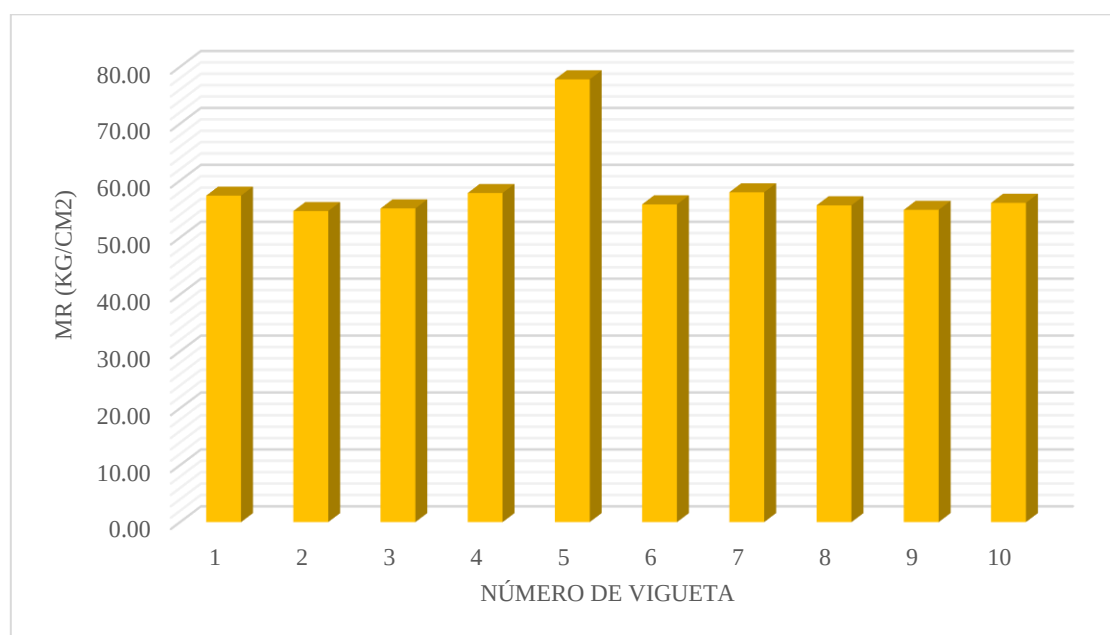
**Nota.** Fuente: Elaboración propia

Tabla 79

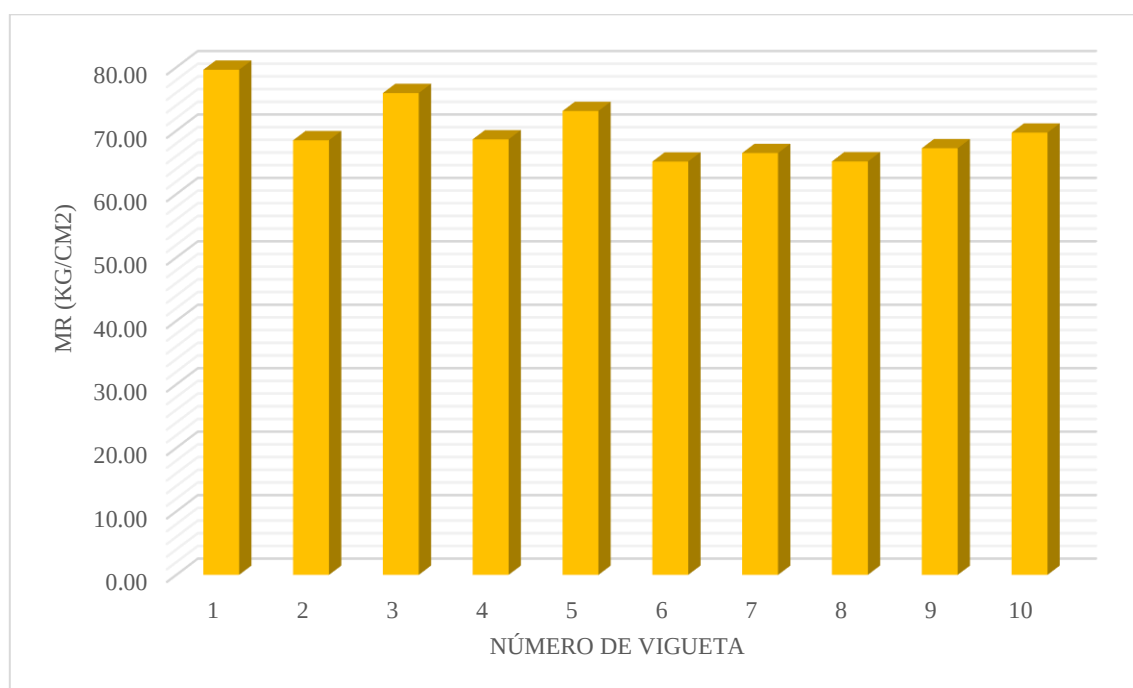
Módulo de rotura del CAC-470

Vigueta	Registro	Edad (días)	L Prom (cm)	A Prom (cm)	H Prom (cm)	Carga (kg-f)	Módulo de Rotura (kg/cm ²)
1	CAC-470-1	28	59.7	15.0	15.0	4500.8	79.61
2	CAC-470-2	28	59.7	14.9	15.0	3827.2	68.50
3	CAC-470-3	28	59.7	15.0	15.0	4252.2	75.94
4	CAC-470-4	28	59.7	15.0	15.1	3914.5	68.64
5	CAC-470-5	28	59.7	15.0	15.0	4154.0	73.11
6	CAC-470-6	28	59.7	15.0	15.0	3700.8	65.14
7	CAC-470-7	28	59.7	15.0	15.1	3791.2	66.48
8	CAC-470-8	28	59.7	15.0	15.0	3702.2	65.16
9	CAC-470-9	28	59.7	14.9	15.0	3789.6	67.23
10	CAC-470-10	28	59.7	15.0	15.0	3928.6	69.69

Nota. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 17

Módulo de rotura obtenida a los 28 días del CAC-470



Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 80

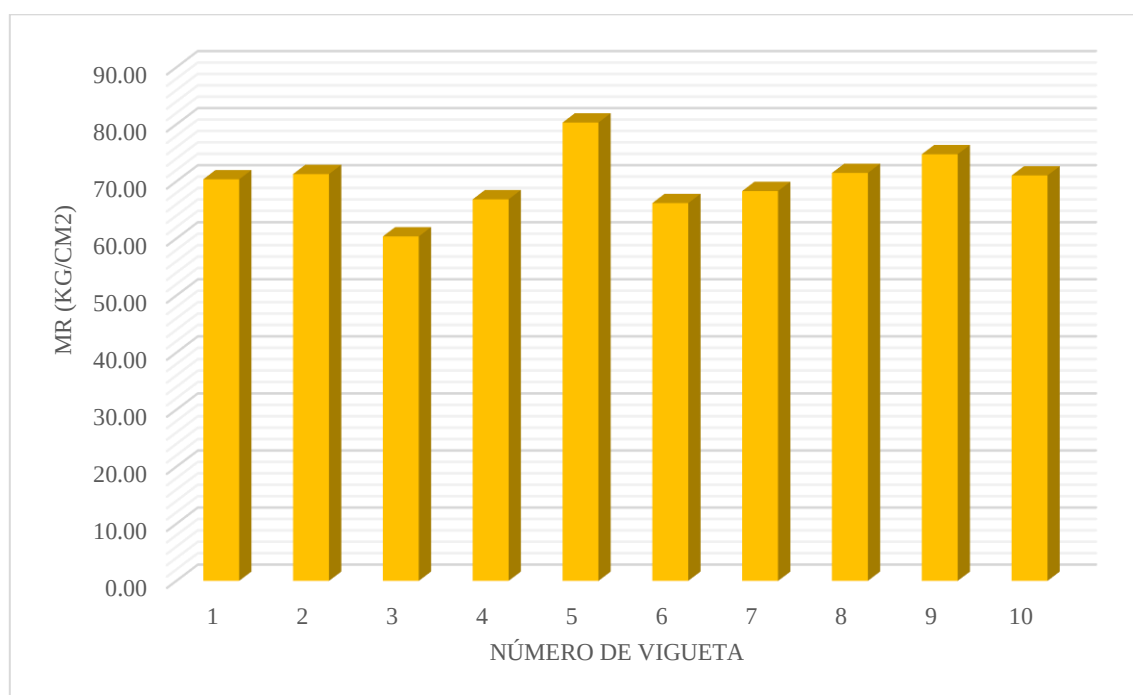
Módulo de rotura del CAC-500

Vigueta	Registro	Edad (días)	L Prom (cm)	A Prom (cm)	H Prom (cm)	Carga (kg-f)	Módulo de Rotura (kg/cm ²)
1	CAC-500-1	28	59.7	15.0	15.0	3978.8	70.38
2	CAC-500-2	28	59.7	15.0	15.0	3992.0	71.30
3	CAC-500-3	28	59.7	15.0	15.1	3442.7	60.37
4	CAC-500-4	28	59.7	15.0	15.0	3799.6	66.88
5	CAC-500-5	28	59.7	15.0	15.0	4563.9	80.33
6	CAC-500-6	28	59.7	15.0	15.1	3775.7	66.21
7	CAC-500-7	28	59.7	15.0	15.0	3882.0	68.33
8	CAC-500-8	28	59.7	15.0	15.0	4061.7	71.49
9	CAC-500-9	28	59.7	15.0	15.0	4186.6	74.77
10	CAC-500-10	28	59.7	15.0	15.0	3989.8	71.05

Nota. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 18

Módulo de rotura obtenida a los 28 días del CAC-500



Nota. Fuente: Elaboración propia

Capítulo V

Análisis e Interpretación de los Resultados

Análisis de los Resultados de los Ensayos de Autocompactabilidad del Concreto

Análisis de los Resultados de Fluides del Mortero

Mini Slump Flow y V-Funnel del Mortero. Como se mencionó estos ensayos sirven para medir la viscosidad y la trabajabilidad del mortero, estos parámetros se propusieron en base a ensayos donde todas las mezclas se ajustaron hasta cumplir con los valores recomendados que son entre 24 y 26 cm de fluides del mini slump flow y entre 7 y 11 segundos del tiempo de descarga del embudo en “V” del mortero.

Tabla 81

Análisis de resultados de la fluides del mortero

Mortero	Diámetro Promedio Mini Slump Flow (cm)	Tiempo de Descarga del Mortero (s)	¿Cumple el diámetro recomendado del flujo de asentamiento del mortero? (24-26cm)	¿Cumple el tiempo de descarga del mortero recomendado? (7-11s)
CAC-355	27.2	11.01	Próximo al valor	Si
CAC-385	30.1	9.35	Próximo al valor	Si
CAC-420	26.5	13.20	Próximo al valor	Si
CAC-450	29.5	11.00	Próximo al valor	Si
CAC-470	29.1	10.00	Próximo al valor	Si
CAC-500	30.1	9.35	Próximo al valor	Si

Nota. Fuente: Elaboración propia

Análisis de los Resultados de Autocompactabilidad de Pruebas al Concreto

Slump Flow, Flujo de Asentamiento (T50) Y VSI. A continuación, se muestra un resumen de los resultados de las mezclas y su clasificación con respecto al ensayo de slump flow, el VSI y los resultados del tiempo T50

Tabla 82*Resultados y caracterización de las mezclas por el flujo de asentamiento del concreto*

Mezcla	Flujo de asentamiento (mm)	Índice de Estabilidad Visual (VSI)	Designación por la norma de las federaciones europeas	¿Cumple el rango de valores del flujo de asentamiento del ACI 237R-07? (450-760mm)	¿Cumple el VSI según la norma ACI 237R-07? (0-1)
CAC-355	513.8	0	SF1	Sí	Sí
CAC-385	546.3	0	SF1	Sí	Sí
CAC-420	622.5	1	SF1	Sí	Sí
CAC-450	580.0	0	SF1	Sí	Sí
CAC-470	757.5	1	SF2 - SF3	Sí	Sí
CAC-500	693.8	0	SF2	Sí	Sí

Nota. Fuente: Elaboración Propia**Tabla 83***Resultados y caracterización de las mezclas por T50*

Mezcla	T50 en (s)	Designación por las federaciones europeas	Viscosidad según el ACI 237R.07
CAC-355	5.125	VS2	Moderada viscosidad
CAC-385	4.23	VS2	Moderada viscosidad
CAC-420	5.10	VS2	Moderada viscosidad
CAC-450	3.085	VS2	Moderada viscosidad
CAC-470	5.71	VS2	Alta viscosidad
CAC-500	4.67	VS2	Moderada viscosidad

Nota. Fuente: Elaboración Propia

Se puede observar que todas las mezclas se ajustaron y que cumplen con los requerimientos propuestos en las normas.

“V” Funnel del Concreto. A continuación, se muestra un resumen de los resultados de las mezclas y su clasificación con respecto al ensayo del tiempo de descarga.

Tabla 84*Resultados y caracterización de las mezclas por el tiempo de descarga*

Mezcla	Tv (s)	Designación por las federaciones europeas
CAC-355	7.52	VF1 y VF2
CAC-385	8.23	VF1 y VF2
CAC-420	12.83	VF2
CAC-450	8.57	VF1 y VF2
CAC-470	13.69	VF2
CAC-500	13.35	VF2

Nota. Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que todas las mezclas se ajustaron y que cumplen con los requerimientos propuestos en las normas.

Ensayo de “L” Box. Las federaciones europeas consideran un valor mínimo de 0.75 como aceptable en el empleo de mezclas, por tanto, nos ceñiremos a este valor, teniendo para esto 3 barras de refuerzo en la caja.

Tabla 85*Resultados de la prueba de la caja en “L”*

Mezcla	H2/H1	¿Cumple los requerimientos de las federaciones europeas ($H2/H1 \geq 0.750$)?
CAC-355	0.700	Próximo al valor
CAC-385	0.750	Si
CAC-420	0.775	Si
CAC-450	0.800	Si
CAC-470	0.950	Si
CAC-500	0.795	Si

Nota. Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que todas las mezclas se ajustaron y que cumplen con los requerimientos propuestos en las normas.

Análisis de los Resultados de las Propiedades Mecánicas del Concreto Autocompactante

Análisis Estadístico de los Resultados de la Resistencia a la Compresión

Prueba de Identificación de Valores Atípicos de la Resistencia a la Compresión.

Tabla 86

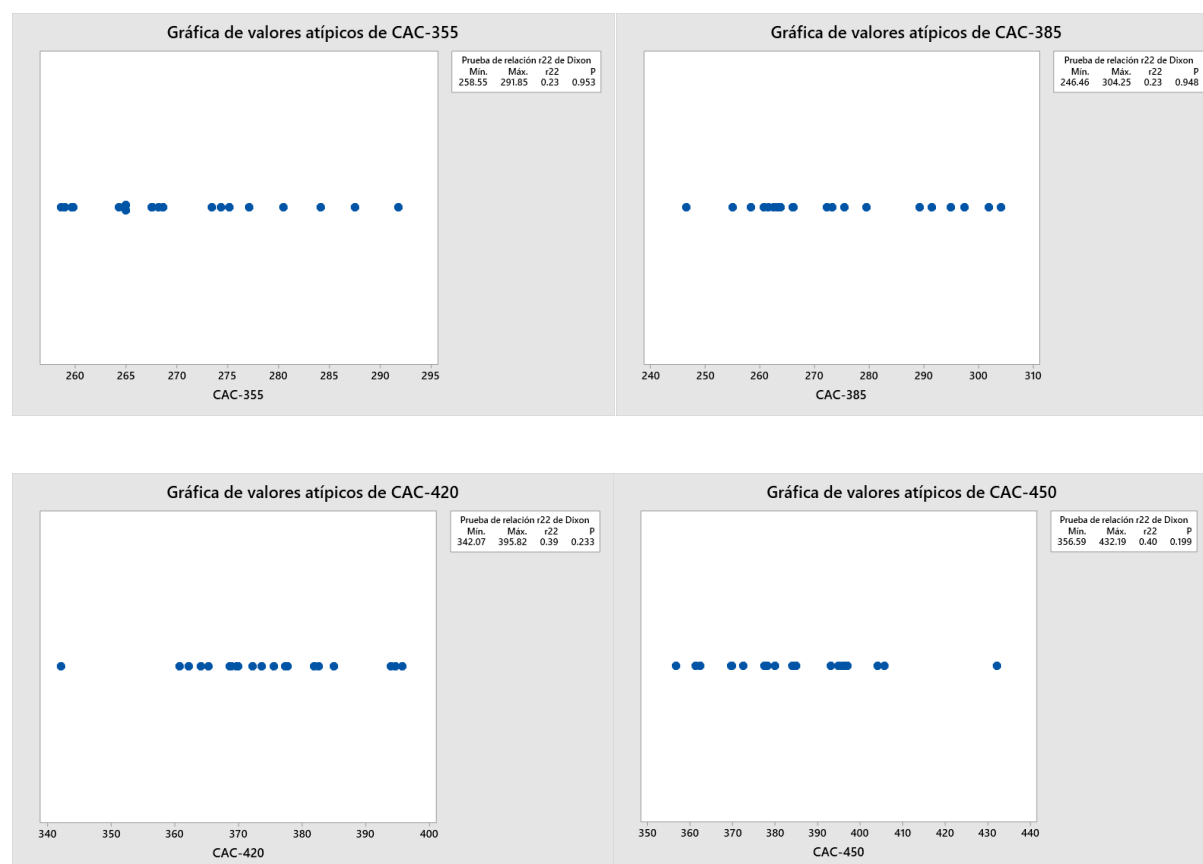
Prueba de relación r_{22} de Dixon de los valores obtenidos en los ensayos de compresión

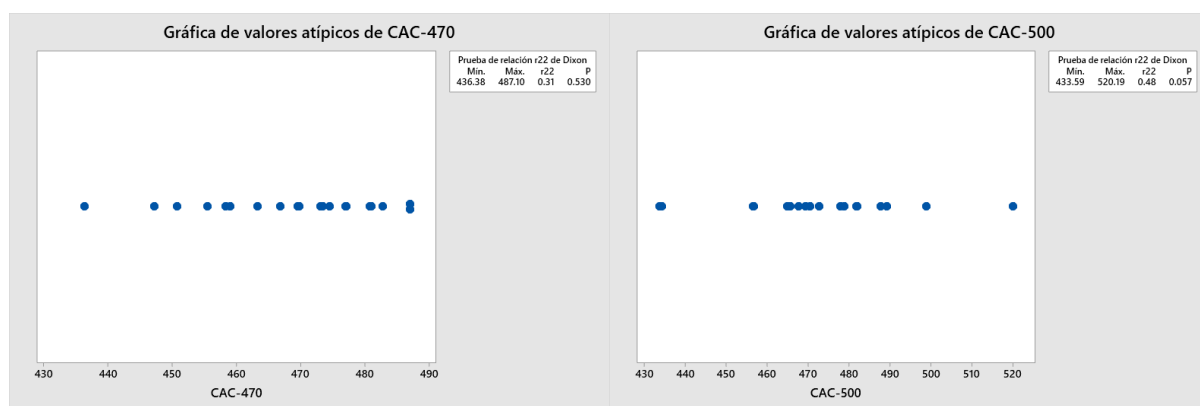
Variable	N	Mín.	x[2]	x[3]	x[N-2]	x[N-1]	Máx.	r22	P
CAC-355	20	258.55	258.61	258.95	284.21	287.54	291.85	0.23	0.953
CAC-385	20	246.46	255.06	258.34	297.44	301.95	304.25	0.23	0.948
CAC-420	20	342.07	360.73	362.23	393.99	394.77	395.82	0.39	0.233
CAC-450	20	356.59	361.25	362.32	404.17	405.76	432.19	0.40	0.199
CAC-470	20	436.38	447.17	450.76	482.80	487.10	487.10	0.31	0.530
CAC-500	20	433.59	434.31	456.53	489.36	498.93	520.19	0.48	0.057

Nota. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 19

Valores atípicos en los resultados de la resistencia a la compresión



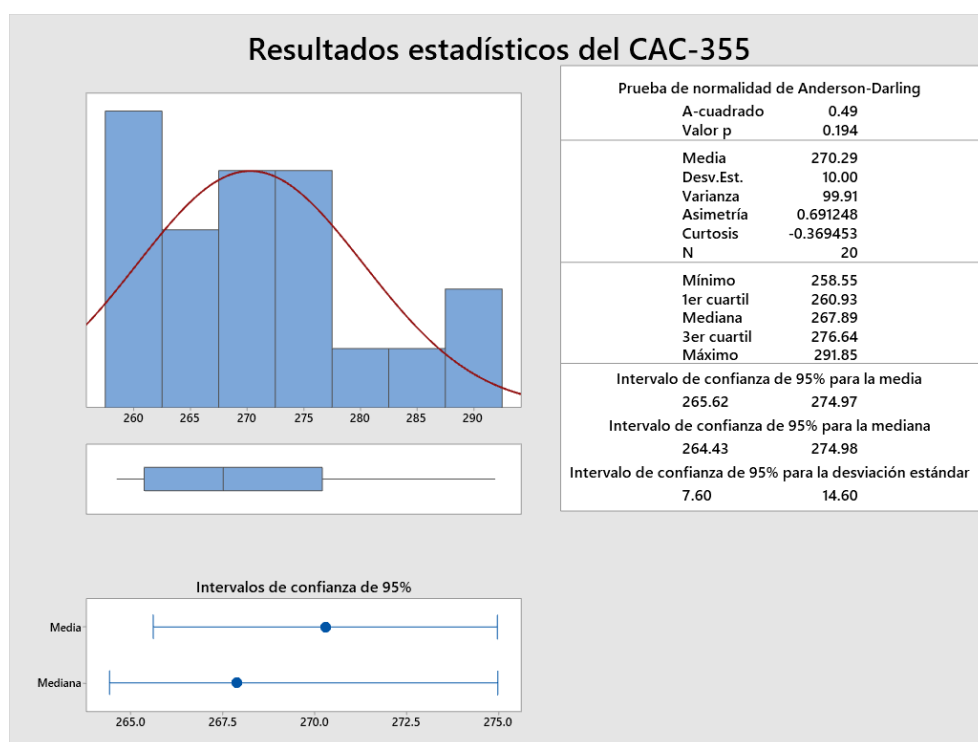


Nota. Fuente: Elaboración propia

Resumen Estadístico de los Resultados de la Resistencia a la Compresión del Concreto Autocompactante.

Gráfica 20

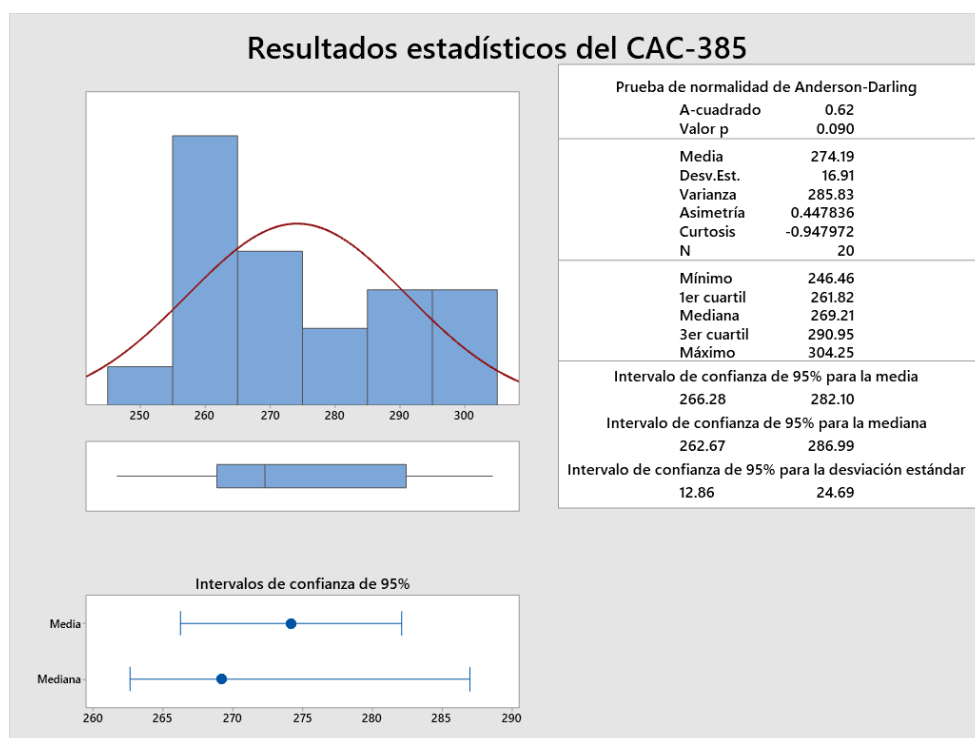
Resumen estadístico de los resultados de la resistencia a la compresión del CAC-355



Nota. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 21

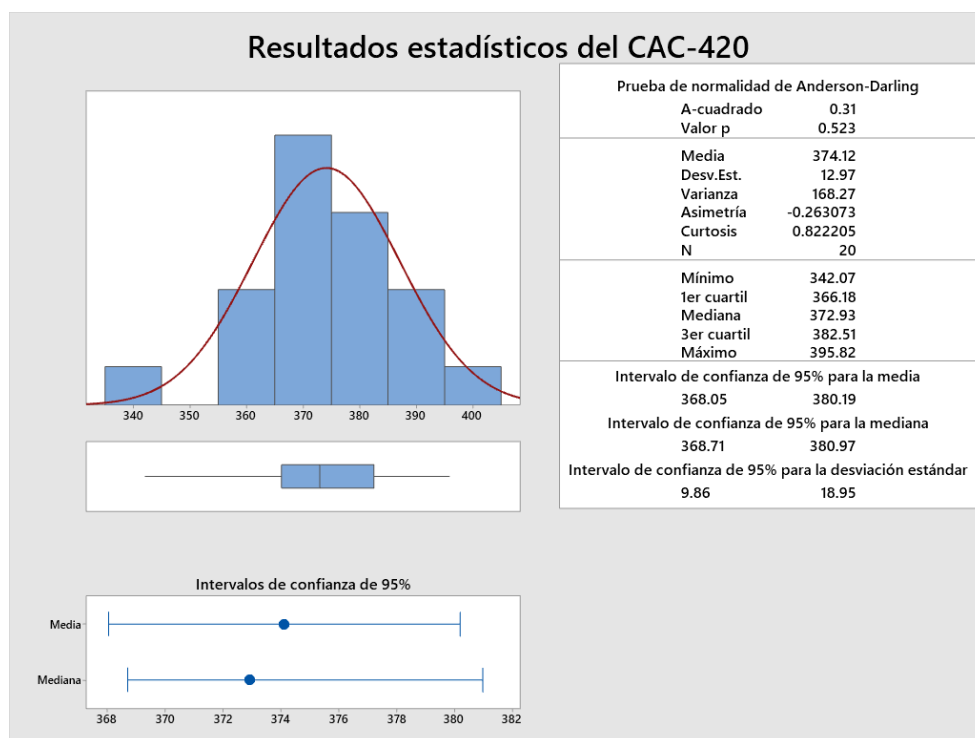
Resumen estadístico de los resultados de la resistencia a la compresión del CAC-385



Nota. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 22

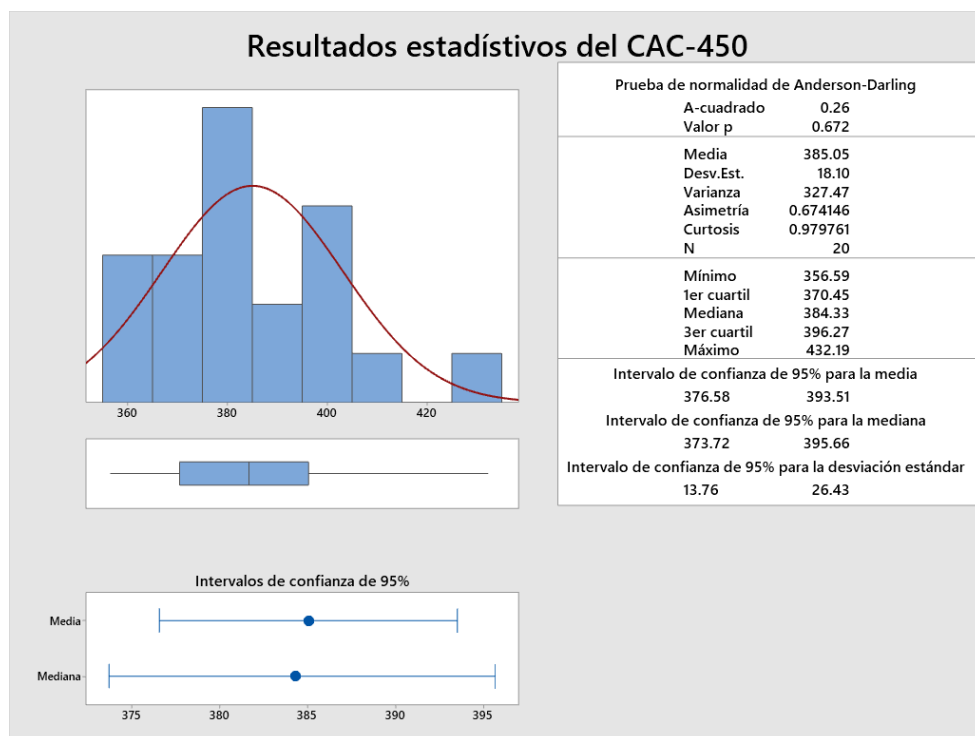
Resumen estadístico de los resultados de la resistencia a la compresión del CAC-420



Nota. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 23

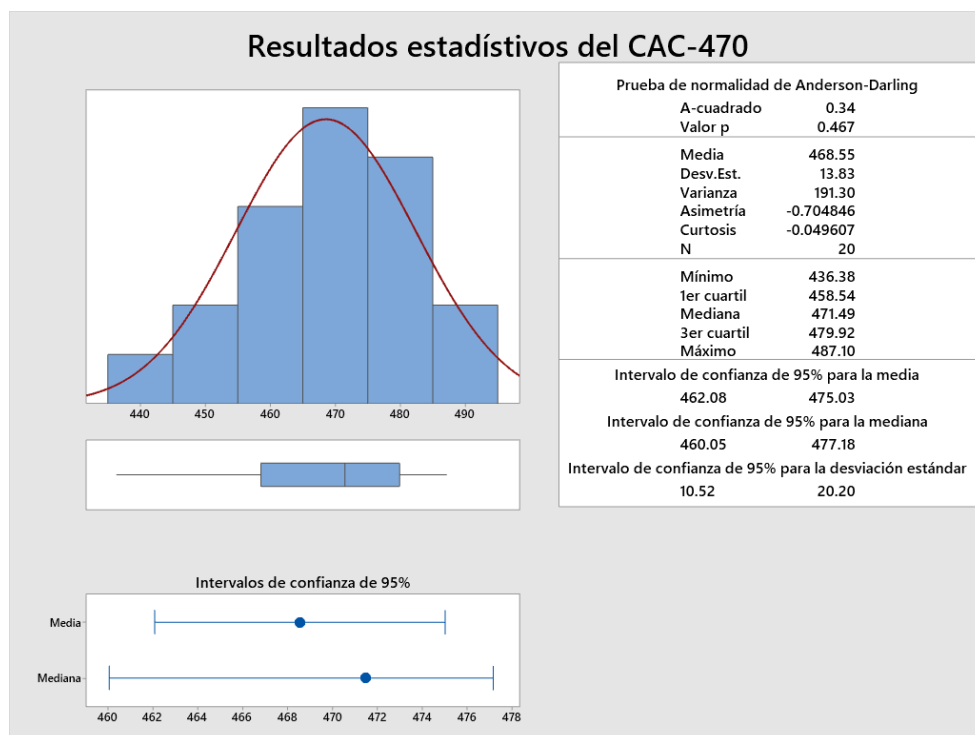
Resumen estadístico de los resultados de la resistencia a la compresión del CAC-450



Nota. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 24

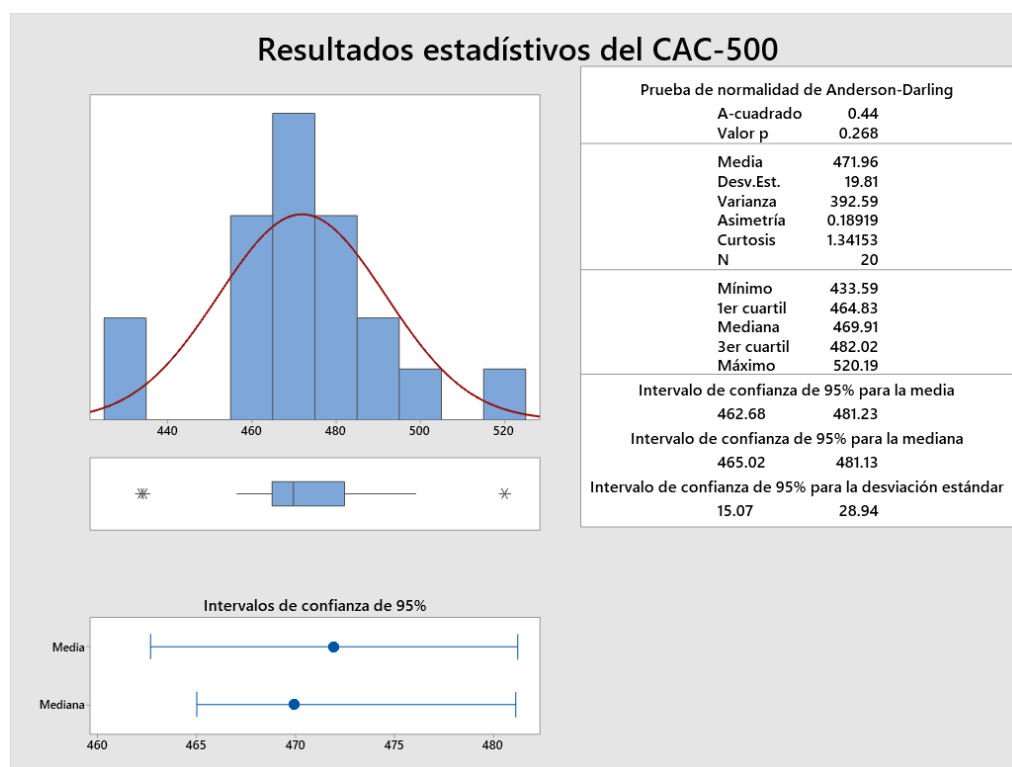
Resumen estadístico de los resultados de la resistencia a la compresión del CAC-470



Nota. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 25

Resumen estadístico de los resultados de la resistencia a la compresión del CAC-500



Nota. Fuente: Elaboración propia

Las resistencias obtenidas a los 28 días de edad de los especímenes (briquetas) del concreto autocompactante CAC-355 tuvo una distribución normal mediante la prueba de Anderson-Darling, sin presencia de datos atípicos de acuerdo al criterio Dickson, con un valor mínimo de 258.55 kg/cm² y valor máximo de 291.85 kg/cm², una varianza de 99.91, Desviación estándar de 10.00, Coeficiente Variabilidad 3.70% que según la ACI 318 el valor del coeficiente de variación debe ser menor que el 9%, su peso unitario en promedio en estado endurecido fue de 2333.28 kg/m³ con un módulo de elasticidad de 254393.6 kg/cm².

Las resistencias obtenidas a los 28 días de edad de los especímenes (briquetas) del concreto autocompactante CAC-385 tuvo una distribución normal mediante la prueba de Anderson-Darling, sin presencia de datos atípicos de acuerdo al criterio Dickson, con un valor mínimo de 246.46 kg/cm² y valor máximo de 304.25 kg/cm², una varianza de 285.83, Desviación estándar de 16.91, Coeficiente Variabilidad 6.17% que según la ACI 318 el valor

del coeficiente de variación debe ser menor que el 9%, su peso unitario en promedio en estado endurecido fue de 2344.23 kg/m³ con un módulo de elasticidad de 258015.3 kg/cm².

Las resistencias obtenidas a los 28 días de edad de los especímenes (briquetas) del concreto autocompactante CAC-420 tuvo una distribución normal mediante la prueba de Anderson-Darling, sin presencia de datos atípicos de acuerdo al criterio Dickson, con un valor mínimo de 342.07 kg/cm² y valor máximo de 395.82 kg/cm², una varianza de 168.27, Desviación estándar de 12.97, Coeficiente Variabilidad 3.47% que según la ACI 318 el valor del coeficiente de variación debe ser menor que el 9%, su peso unitario en promedio en estado endurecido fue de 2356.75 kg/m³ con un módulo de elasticidad de 303812.7 kg/cm².

Las resistencias obtenidas a los 28 días de edad de los especímenes (briquetas) del concreto autocompactante CAC-450 tuvo una distribución normal mediante la prueba de Anderson-Darling, sin presencia de datos atípicos de acuerdo al criterio Dickson, con un valor mínimo de 385.05 kg/cm² y valor máximo de 432.19 kg/cm², una varianza de 327.47, Desviación estándar de 18.10, Coeficiente Variabilidad 4.70% que según la ACI 318 el valor del coeficiente de variación debe ser menor que el 9%, su peso unitario en promedio en estado endurecido fue de 2339.33 kg/m³ con un módulo de elasticidad de 304819.1 kg/cm².

Las resistencias obtenidas a los 28 días de edad de los especímenes (briquetas) del concreto autocompactante CAC-470 tuvo una distribución normal mediante la prueba de Anderson-Darling, sin presencia de datos atípicos de acuerdo al criterio Dickson, con un valor mínimo de 436.38 kg/cm² y valor máximo de 487.10 kg/cm², una varianza de 191.30, Desviación estándar de 13.83, Coeficiente Variabilidad 2.95% que según la ACI 318 el valor del coeficiente de variación debe ser menor que el 9%, su peso unitario en promedio en estado endurecido fue de 2358.47 kg/m³ con un módulo de elasticidad de 340406.4 kg/cm².

Las resistencias obtenidas a los 28 días de edad de los especímenes (briquetas) del concreto autocompactante CAC-500 tuvo una distribución normal mediante la prueba de Anderson-Darling, sin presencia de datos atípicos de acuerdo al criterio Dickson, con un valor mínimo de 433.59 kg/cm² y valor máximo de 520.19 kg/cm², una varianza de 392.59, Desviación estándar de 19.81, Coeficiente Variabilidad 2.95% que según la ACI 318 el valor del coeficiente de variación debe ser menor que el 9%, su peso unitario en promedio en estado endurecido fue de 2348.36 kg/m³ con un módulo de elasticidad de 339423.2 kg/cm².

Análisis de Varianza ANOVA de los Resultados de la Resistencia a la Compresión del Concreto Autocompactante.

Tabla 87

Resultados de la resistencia a la compresión de los especímenes

Briqueta	CAC-355	CAC-385	CAC-420	CAC-450	CAC-470	CAC-500
1	264.26	261.60	360.73	369.75	436.38	520.19
2	259.62	297.44	373.67	362.32	450.76	477.87
3	267.56	255.06	362.23	384.01	481.03	467.66
4	268.62	260.76	365.35	361.25	455.45	464.84
5	274.36	291.50	369.94	372.56	463.27	470.52
6	284.21	246.46	393.99	369.60	459.06	434.31
7	280.47	289.29	372.20	404.17	469.79	489.36
8	273.47	275.47	385.09	394.97	480.82	478.84
9	268.23	258.34	377.69	384.65	474.58	456.68
10	277.13	266.09	375.56	378.24	473.48	482.08
11	287.54	273.31	342.07	396.40	487.10	464.83
12	291.85	263.24	377.36	405.76	458.37	465.68
13	258.61	301.95	382.69	432.19	447.17	472.71
14	264.98	294.95	381.98	356.59	482.80	498.93
15	267.53	279.50	368.85	380.01	466.85	469.30
16	275.17	266.00	394.77	393.10	473.19	465.59
17	259.82	272.32	369.76	395.88	477.21	433.59
18	258.55	263.76	368.67	384.90	477.08	487.76
19	264.98	304.25	395.82	377.49	469.61	481.84
20	258.95	262.49	364.05	397.05	487.10	456.53

Nota. Fuente: Elaboración propia

– Análisis de Varianza.

Tabla 88*Análisis de varianza*

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F
Factor	$SS_F = \sum_{i=1}^k n_i \times (\bar{y}_i - \bar{y})^2$	$k - 1$	$MSE_F = \frac{SS_F}{k - 1}$	$F = \frac{MSE_F}{MSE_E}$
Error	$SS_E = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2$	$N - k$	$MSE_E = \frac{SS_E}{N - k}$	
Total	$SS_T = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y})^2$	$N - 1$		

Nota. Fuente: Recopilaciones

– Método

Hipótesis nula: Todas las medias son iguales.

Hipótesis alterna: No todas las medias son iguales.

Tabla 89*Resultado del análisis de varianza de las muestras a compresión*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	5	787504	157501	644.90	0.000
Error	114	27842	244		
Total	119	815346			

Nota. Resultados extraídos del Minitab (Se rechaza la hipótesis nula) Fuente: Propia**Tabla 90***Intervalos de confianza de la resistencia a la compresión del concreto autocompactante*

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
CAC-355	20	270.29	10.00	(263.37; 277.22)
CAC-385	20	274.19	16.91	(267.27; 281.11)
CAC-420	20	374.12	12.97	(367.20; 381.05)
CAC-450	20	385.05	18.10	(378.12; 391.97)
CAC-470	20	468.55	13.83	(461.63; 475.48)
CAC-500	20	471.96	19.81	(465.03; 478.88)

Nota. Fuente: Elaboración Propia

– Método de Turkey

$$T_a = q_a(k, N - k) \times \sqrt{\frac{MSE_E}{n_i}}$$

– Comparaciones en pareja de Turkey

Tabla 91

Comparaciones método de Tukey y una confianza de 95% de la resistencia a la compresión

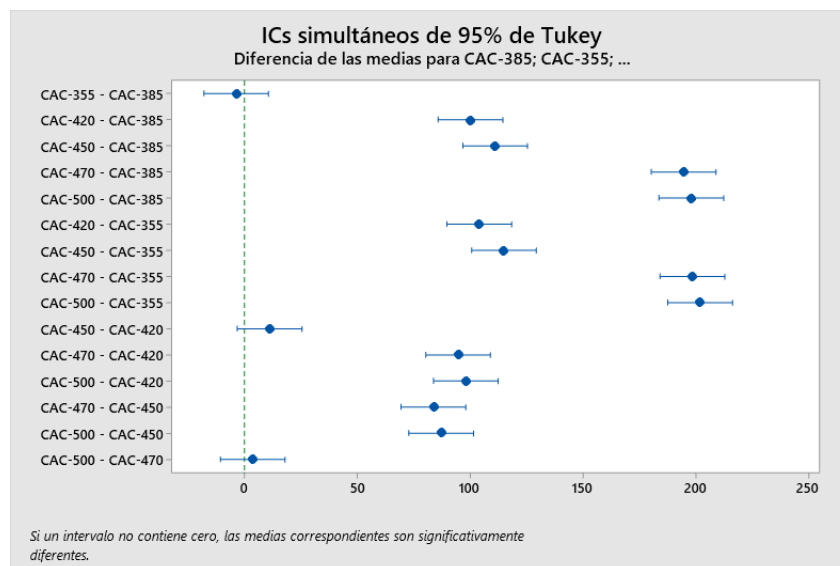
Factor	N	Media	Agrupación
CAC-500	20	471.96	A
CAC-470	20	468.55	A
CAC-450	20	385.05	B
CAC-420	20	374.12	B
CAC-385	20	274.19	C
CAC-355	20	270.29	C

Nota. Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes. Fuente: Elaboración propia

En la tabla anterior se puede afirmar que si se diseña un concreto autocompactante con un contenido de cemento de 355 - 385 kg/m³, se obtendrán resistencias similares a compresión por cualquiera de los procesos debido a que no existe diferencia significativa entre ambos, del mismo modo para las mezclas que se diseñaron concreto con contenido de cemento de 420 - 450 kg/m³ o 470 - 500 kg/m³.

Gráfica 26

Intervalos de confianza de la resistencia a la compresión



Nota. Fuente: Elaboración Propia

Análisis Estadístico de los Resultados de la Resistencia a la Flexión

Prueba de Identificación de Valores Atípicos de la Resistencia a la Flexión.

Tabla 92

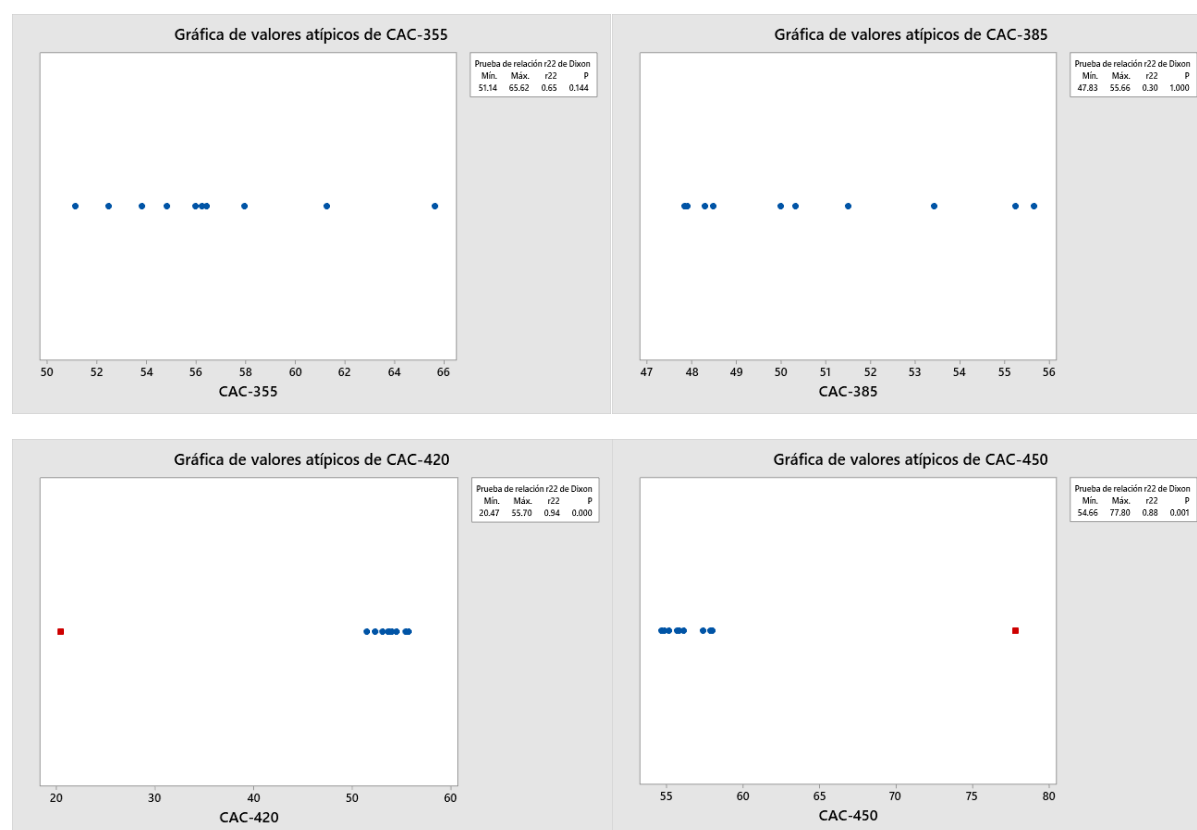
Prueba de relación r_{22} de Dixon de los valores obtenidos en los ensayos de flexión

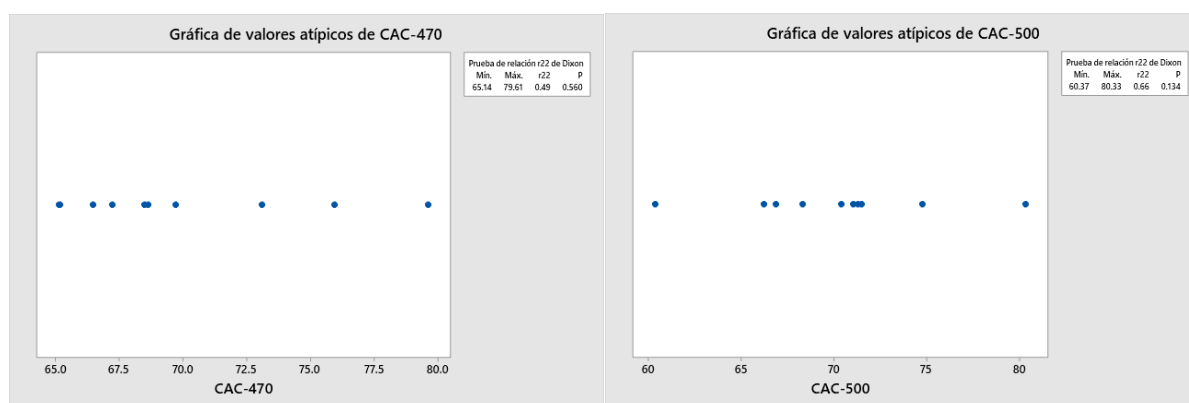
Variable	N	Mín.	x[2]	x[3]	x[N-2]	x[N-1]	Máx.	r_{22}	P
CAC-355	10	51.14	52.48	53.82	57.94	61.25	65.62	0.65	0.144
CAC-385	10	47.83	47.893	48.303	53.429	55.244	55.656	0.30	1.000
CAC-420	10	20.47	51.52	52.31	54.48	55.41	55.70	0.94	0.000
CAC-450	10	54.66	54.87	55.11	57.83	57.96	77.80	0.88	0.001
CAC-470	10	65.14	65.16	66.48	73.11	75.94	79.61	0.49	0.560
CAC-500	10	60.37	66.21	66.88	71.49	74.77	80.33	0.66	0.134

Nota. Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 27

Valores atípicos en los resultados de la resistencia a la flexión





Nota. Fuente: Elaboración Propia

Tabla 93

Valores atípicos de la resistencia a la flexión

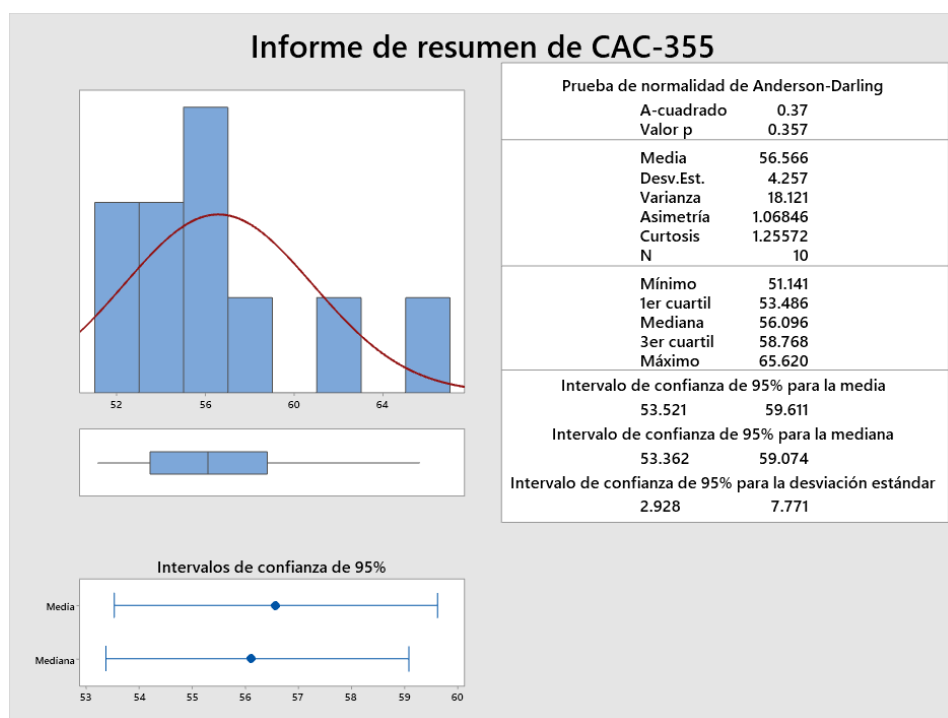
Variable	Fila	Valor atípico
CAC-420	1	20.47
CAC-450	5	77.8

Nota. Fuente: Elaboración propia

Resumen Estadístico de los Resultados de la Resistencia a la Flexión del Concreto Autocompactante.

Gráfica 28

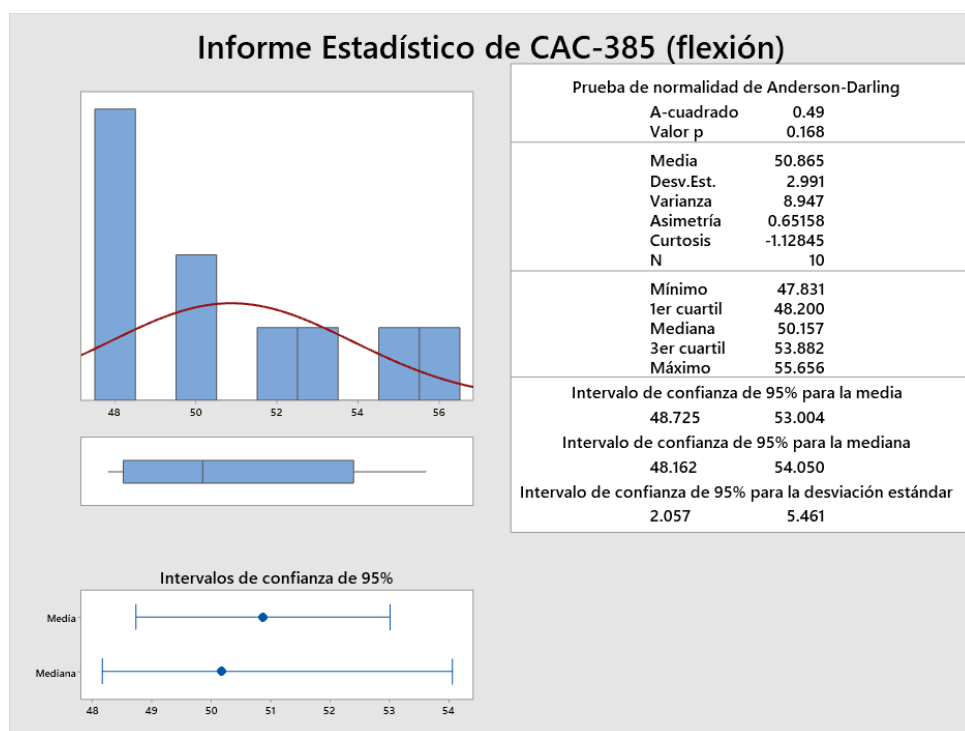
Resumen estadístico de los resultados de la resistencia a la flexión del CAC-355



Nota. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 29

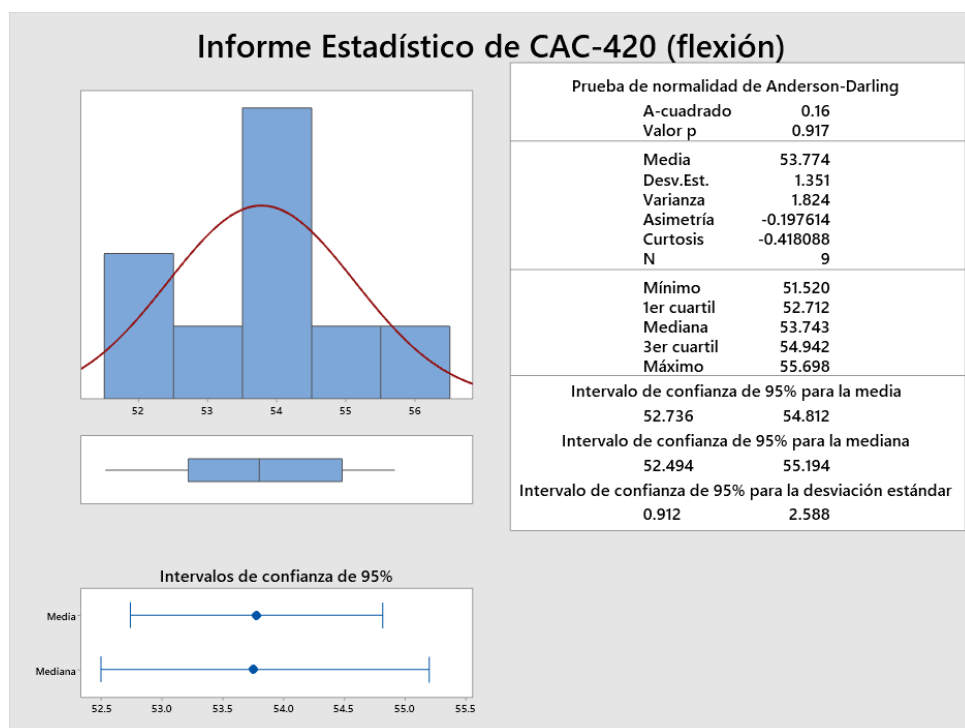
Resumen estadístico de los resultados de la resistencia a la flexión del CAC-385



Nota. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 30

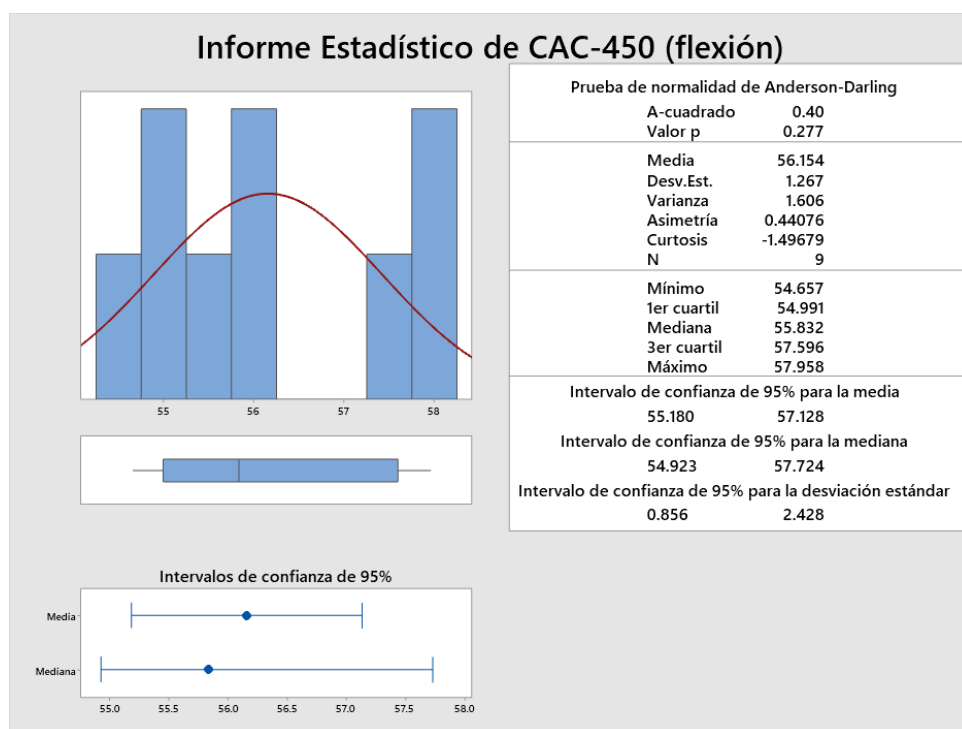
Resumen Estadístico de los resultados de la resistencia a la flexión del CAC-420



Nota. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 31

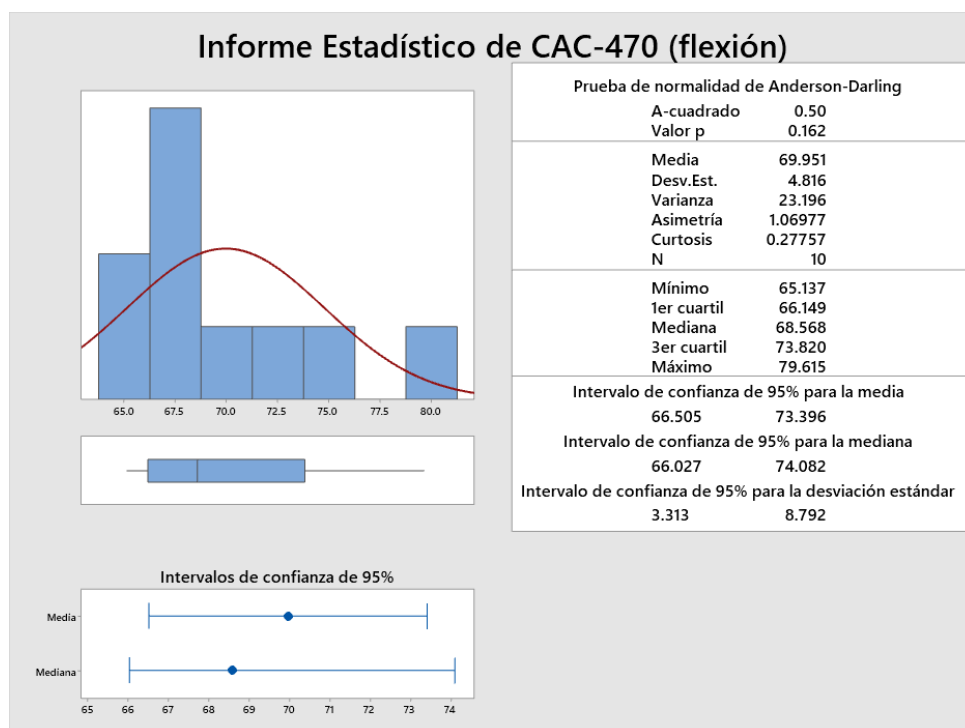
Resumen estadístico de los resultados de la resistencia a la flexión del CAC-450



Nota. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 32

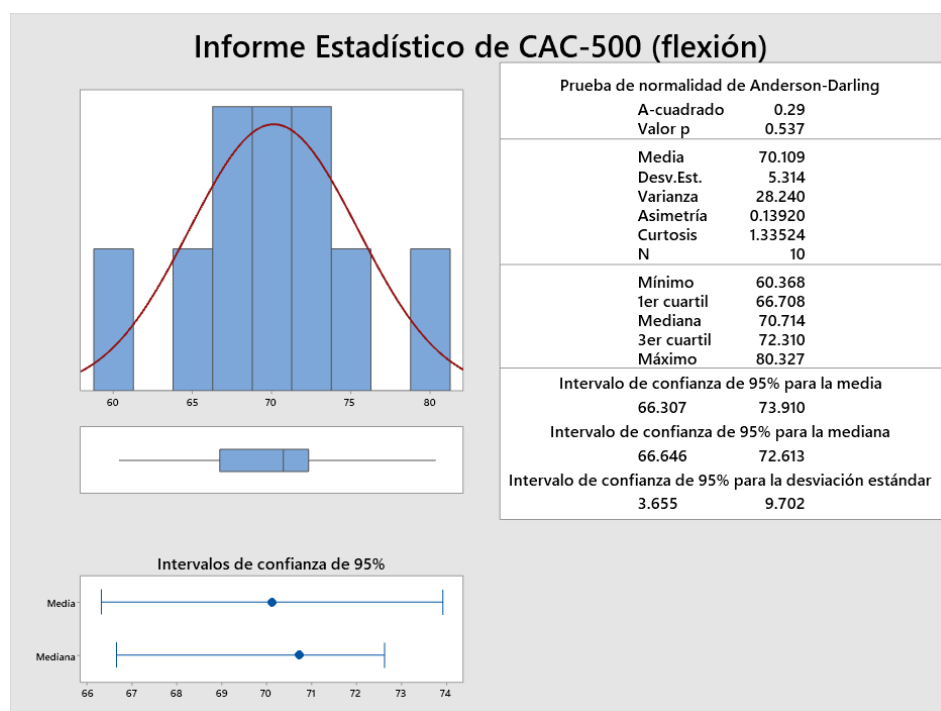
Resumen estadístico de los resultados de la resistencia a la flexión del CAC-470



Nota. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 33

Resumen estadístico de los resultados de la resistencia a la flexión del CAC-500



Nota. Fuente: Elaboración propia

Las resistencias obtenidas a los 28 días de edad de los especímenes (viguetas) del concreto autocompactante CAC-355 tuvo una distribución normal mediante la prueba de Anderson-Darling, sin presencia de datos atípicos de acuerdo al criterio Dickson, con un valor mínimo de 51.14 kg/cm² y valor máximo de 65.620 kg/cm², una varianza de 18.12, Desviación estándar de 4.26.

Las resistencias obtenidas a los 28 días de edad de los especímenes (viguetas) del concreto autocompactante CAC-385 tuvo una distribución normal mediante la prueba de Anderson-Darling, sin presencia de datos atípicos de acuerdo al criterio Dickson, con un valor mínimo de 47.83 kg/cm² y valor máximo de 55.66 kg/cm², una varianza de 8.95, Desviación estándar de 2.99.

Las resistencias obtenidas a los 28 días de edad de los especímenes (viguetas) del concreto autocompactante CAC-420 tuvo una distribución normal mediante la prueba de Anderson-Darling, con presencia de un dato atípico de acuerdo al criterio Dickson (20.47

kg/cm²) dicho valor fue excluido para los análisis posteriores, con un valor mínimo de 51.52 kg/cm² y valor máximo de 55.70 kg/cm², una varianza de 1.82, Desviación estándar de 1.35.

Las resistencias obtenidas a los 28 días de edad de los especímenes (viguetas) del concreto autocompactante CAC-450 tuvo una distribución normal mediante la prueba de Anderson-Darling, con presencia de un dato atípico de acuerdo al criterio Dickson (77.80 kg/cm²) dicho valor fue excluido para los análisis posteriores, con un valor mínimo de 54.66 kg/cm² y valor máximo de 57.96 kg/cm², una varianza de 1.61, Desviación estándar de 1.27.

Las resistencias obtenidas a los 28 días de edad de los especímenes (viguetas) del concreto autocompactante CAC-470 tuvo una distribución normal mediante la prueba de Anderson-Darling, con un valor mínimo de 65.14 kg/cm² y valor máximo de 79.62 kg/cm², una varianza de 23.20, Desviación estándar de 4.82.

Las resistencias obtenidas a los 28 días de edad de los especímenes (viguetas) del concreto autocompactante CAC-500 tuvo una distribución normal mediante la prueba de Anderson-Darling, con un valor mínimo de 60.37 kg/cm² y valor máximo de 80.33 kg/cm², una varianza de 28.24, Desviación estándar de 5.31.

Análisis de Varianza ANOVA de los Resultados de la Resistencia a la Flexión del Concreto Autocompactante.

Tabla 94

Resultados de la prueba a flexión de los especímenes

Vigueta	CAC-355	CAC-385	CAC-420	CAC-450	CAC-470	CAC-500
1	56.22	48.47	20.47	57.36	79.61	70.38
2	52.48	47.89	53.66	54.66	68.50	71.30
3	65.62	48.30	55.70	55.11	75.94	60.37
4	61.25	51.51	53.74	57.83	68.64	66.88
5	55.97	55.66	55.41	77.80	73.11	80.33
6	53.82	55.24	54.48	55.83	65.14	66.21
7	57.94	47.83	51.52	57.96	66.48	68.33
8	51.14	49.98	53.11	55.66	65.16	71.49
9	54.81	53.43	52.31	54.87	67.23	74.77

10	56.41	50.33	54.03	56.11	69.69	71.05
----	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Nota. Fuente: Elaboración propia

- Análisis de Varianza

Tabla 95

Análisis de varianza

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F
Factor	$SS_F = \sum_{i=1}^k n_i \times (\bar{y}_i - \bar{y})^2$	$k - 1$	$MSE_F = \frac{SS_F}{k - 1}$	$F = \frac{MSE_F}{MSE_E}$
Error	$SS_E = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2$	$N - k$	$MSE_E = \frac{SS_E}{N - k}$	
Total	$SS_T = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y})^2$	$N - 1$		

Nota. Fuente: Recopilaciones

Tabla 96

Resultado del análisis de varianza de las muestras a flexión

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	5	3832	766.46	18.41	0.000
Error	54	2249	41.64		
Total	59	6081			

Nota. Resultados extraídos del Minitab (Se rechaza la hipótesis nula) Fuente: Propia

Tabla 97

Intervalos de confianza

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
CAC-355	10	57.63	5.35	(53.54; 61.72)
CAC-385	10	50.865	2.991	(46.774; 54.956)
CAC-420	10	50.44	10.61	(46.35; 54.53)
CAC-450	10	58.32	6.95	(54.23; 62.41)
CAC-470	10	69.95	4.82	(65.86; 74.04)
CAC-500	10	70.11	5.31	(66.02; 74.20)

Nota. Fuente: Elaboración Propia

- Método de Turkey

$$T_a = q_a(k, N - k) \times \sqrt{\frac{MSE_E}{n_i}}$$

- Comparaciones en pareja de Turkey

Tabla 98

Información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

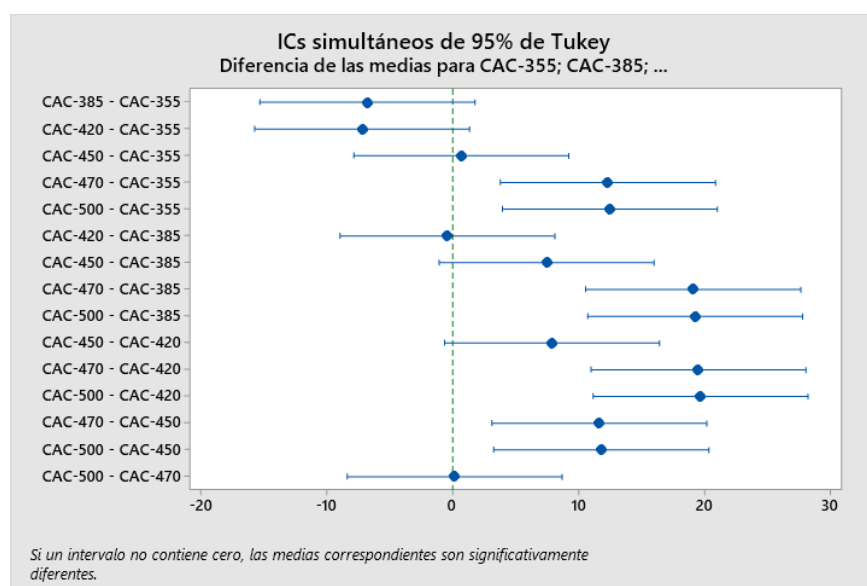
Factor	N	Media	Agrupación
CAC-500	10	70.11	A
CAC-470	10	69.95	A
CAC-450	10	58.32	B
CAC-355	10	57.63	B
CAC-385	10	50.865	B
CAC-420	10	50.44	B

Nota. Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes. Fuente: Elaboración propia

En la tabla anterior se puede afirmar que si se diseña un concreto autocompactante con un contenido de cemento de 355 - 385 kg/m³, se obtendrán resistencias similares a tracción (módulo de rotura) por cualquiera de los procesos debido a que no existe diferencia significativa entre ambos, del mismo modo para las mezclas que se diseñaron concreto con contenido de cemento de 420, 450, 470 y 500 kg/m³.

Gráfica 34

Intervalos de confianza



Nota. Fuente: Elaboración Propia

Análisis Estadístico de la Ecuación de Regresión Lineal Múltiple.

Análisis de los Resultados de la Regresión Lineal Múltiple para Predecir la Resistencia a Compresión

Los coeficientes de regresión parcial de las variables predictoras matricialmente se determinan de la siguiente manera

$$X^T \cdot Y = X^T \cdot X \cdot a$$
$$a = (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot Y$$

donde:

Y: Vector de variable de respuesta

X: Matriz de variables predictoras

a: Vector de coeficientes de regresión

Estas variables predictoras en la presente investigación están conformadas por el cemento, agua, agregado grueso y agregado fino y superplastificante, la ecuación de regresión lineal múltiple será de la siguiente forma:

$$y = ax_1 + bx_2 + cx_3 + dx_4 + dx_5$$

Donde:

y: resistencia a la compresión (kg/cm²)

x₁: cemento (kg/m³)

x₂: agua (kg/m³)

x₃: agregado grueso (kg/m³)

x₄: agregado fino (kg/m³)

x₅: Superplastificante (kg/m³)

a: coeficiente de regresión parcial del cemento

b: coeficiente de regresión parcial del agua

c: coeficiente de regresión parcial del agregado grueso

d: coeficiente de regresión parcial del agregado fino

e: coeficiente de regresión parcial del aditivo superplastificante

En la siguiente tabla se muestran los datos obtenidos de la resistencia a la compresión a diferentes dosificaciones con las que se elaboró la ecuación y análisis mediante el software estadístico Minitab.

Tabla 99

Resultados de las observaciones de la resistencia a la compresión en laboratorio del concreto autocompactante

X1	X2	X3	X4	X5	Y
355	202.35	807.46	886.90	2.49	261.60
385	219.45	769.09	823.73	2.43	264.26
420	205.80	775.49	878.15	3.53	360.73
450	220.50	793.07	798.71	3.38	369.75
470	202.10	777.08	823.95	3.90	436.38
500	215.00	781.88	820.02	4.00	520.19
355	202.35	807.46	886.90	2.49	297.44
385	219.45	769.09	823.73	2.43	259.62
420	205.80	775.49	878.15	3.53	373.67
450	220.50	793.07	798.71	3.38	362.32
470	202.10	777.08	823.95	3.90	450.76
500	215.00	781.88	820.02	4.00	477.87
355	202.35	807.46	886.90	2.49	255.06
385	219.45	769.09	823.73	2.43	267.56
420	205.80	775.49	878.15	3.53	362.23
450	220.50	793.07	798.71	3.38	384.01
470	202.10	777.08	823.95	3.90	481.03
500	215.00	781.88	820.02	4.00	467.66
355	202.35	807.46	886.90	2.49	260.76
385	219.45	769.09	823.73	2.43	268.62
420	205.80	775.49	878.15	3.53	365.35
450	220.50	793.07	798.71	3.38	361.25
470	202.10	777.08	823.95	3.90	455.45
500	215.00	781.88	820.02	4.00	464.84
355	202.35	807.46	886.90	2.49	291.50
385	219.45	769.09	823.73	2.43	274.36
420	205.80	775.49	878.15	3.53	369.94
450	220.50	793.07	798.71	3.38	372.56
470	202.10	777.08	823.95	3.90	463.27
500	215.00	781.88	820.02	4.00	470.52
355	202.35	807.46	886.90	2.49	246.46
385	219.45	769.09	823.73	2.43	284.21
420	205.80	775.49	878.15	3.53	393.99
450	220.50	793.07	798.71	3.38	369.60
470	202.10	777.08	823.95	3.90	459.06
500	215.00	781.88	820.02	4.00	434.31
355	202.35	807.46	886.90	2.49	289.29
385	219.45	769.09	823.73	2.43	280.47
420	205.80	775.49	878.15	3.53	372.20

Tabla 99

Resultados de las observaciones de la resistencia a la compresión en laboratorio del concreto autocompactante

470	202.10	777.08	823.95	3.90	469.79
500	215.00	781.88	820.02	4.00	489.36
355	202.35	807.46	886.90	2.49	275.47
385	219.45	769.09	823.73	2.43	273.47
420	205.80	775.49	878.15	3.53	385.09
450	220.50	793.07	798.71	3.38	394.97
470	202.10	777.08	823.95	3.90	480.82
500	215.00	781.88	820.02	4.00	478.84
355	202.35	807.46	886.90	2.49	258.34
385	219.45	769.09	823.73	2.43	268.23
420	205.80	775.49	878.15	3.53	377.69
450	220.50	793.07	798.71	3.38	384.65
470	202.10	777.08	823.95	3.90	474.58
500	215.00	781.88	820.02	4.00	456.68
355	202.35	807.46	886.90	2.49	266.09
385	219.45	769.09	823.73	2.43	277.13
420	205.80	775.49	878.15	3.53	375.56
450	220.50	793.07	798.71	3.38	378.24
470	202.10	777.08	823.95	3.90	473.48
500	215.00	781.88	820.02	4.00	482.08
355	202.35	807.46	886.90	2.49	273.31
385	219.45	769.09	823.73	2.43	287.54
420	205.80	775.49	878.15	3.53	342.07
450	220.50	793.07	798.71	3.38	396.40
470	202.10	777.08	823.95	3.90	487.10
500	215.00	781.88	820.02	4.00	464.83
355	202.35	807.46	886.90	2.49	263.24
385	219.45	769.09	823.73	2.43	291.85
420	205.80	775.49	878.15	3.53	377.36
450	220.50	793.07	798.71	3.38	405.76
470	202.10	777.08	823.95	3.90	458.37
500	215.00	781.88	820.02	4.00	465.68
355	202.35	807.46	886.90	2.49	258.61
385	219.45	769.09	823.73	2.43	301.95
420	205.80	775.49	878.15	3.53	382.69
450	220.50	793.07	798.71	3.38	432.19
470	202.10	777.08	823.95	3.90	447.17
500	215.00	781.88	820.02	4.00	472.71
355	202.35	807.46	886.90	2.49	294.95

Tabla 100

Resultados de las observaciones de la resistencia a la compresión en laboratorio del concreto autocompactante

385	219.45	769.09	823.73	2.43	264.98
420	205.80	775.49	878.15	3.53	381.98
450	220.50	793.07	798.71	3.38	356.59
470	202.10	777.08	823.95	3.90	482.80
500	215.00	781.88	820.02	4.00	498.93
355	202.35	807.46	886.90	2.49	279.50
385	219.45	769.09	823.73	2.43	267.53
420	205.80	775.49	878.15	3.53	368.85
450	220.50	793.07	798.71	3.38	380.01
470	202.10	777.08	823.95	3.90	466.85
500	215.00	781.88	820.02	4.00	469.30
355	202.35	807.46	886.90	2.49	266.00
385	219.45	769.09	823.73	2.43	275.17
420	205.80	775.49	878.15	3.53	394.77
450	220.50	793.07	798.71	3.38	393.10
470	202.10	777.08	823.95	3.90	473.19
500	215.00	781.88	820.02	4.00	465.59
355	202.35	807.46	886.90	2.49	272.32
385	219.45	769.09	823.73	2.43	259.82
420	205.80	775.49	878.15	3.53	369.76
450	220.50	793.07	798.71	3.38	395.88
470	202.10	777.08	823.95	3.90	477.21
500	215.00	781.88	820.02	4.00	433.59
355	202.35	807.46	886.90	2.49	263.76
385	219.45	769.09	823.73	2.43	258.55
420	205.80	775.49	878.15	3.53	368.67
450	220.50	793.07	798.71	3.38	384.90
470	202.10	777.08	823.95	3.90	477.08
500	215.00	781.88	820.02	4.00	487.76
355	202.35	807.46	886.90	2.49	304.25
385	219.45	769.09	823.73	2.43	264.98
420	205.80	775.49	878.15	3.53	395.82
450	220.50	793.07	798.71	3.38	377.49
470	202.10	777.08	823.95	3.90	469.61
500	215.00	781.88	820.02	4.00	481.84
355	202.35	807.46	886.90	2.49	262.49
385	219.45	769.09	823.73	2.43	258.95
420	205.80	775.49	878.15	3.53	364.05
450	220.50	793.07	798.71	3.38	397.05
470	202.10	777.08	823.95	3.90	487.10
500	215.00	781.88	820.02	4.00	456.53

Nota. Fuente: Elaboración Propia

A continuación, se muestra los resultados obtenidos del análisis estadístico de regresión lineal múltiple obtenidos mediante el Software estadístico Minitab.

Ecuación de regresión

$$\hat{f}_c = 705 + 0.967 \text{ Cemento} - 3.019 \text{ Agua} + 0.093 \text{ Ag. grueso} - 0.395 \text{ Ag. fino} + 45.2 \text{ SP}$$

Coefficientes

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	705	185	3.80	0.000	
Cemento	0.967	0.209	4.62	0.000	52.63
Agua	-3.019	0.353	-8.54	0.000	3.67
Ag. grueso	0.093	0.122	0.76	0.446	1.19
Ag. fino	-0.395	0.115	-3.45	0.001	6.75
SP	45.2	14.6	3.09	0.003	40.76

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
15.6277	96.59%	96.44%	96.22%

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	5	787504	157501	644.90	0.000
Cemento	1	5209	5209	21.33	0.000
Agua	1	17813	17813	72.94	0.000
Ag. grueso	1	143	143	0.58	0.446
Ag. fino	1	2907	2907	11.90	0.001
SP	1	2325	2325	9.52	0.003
Error	114	27842	244		
Total	119	815346			

En el análisis realizado se puede observar que los valores VIF de las variables predictores como el cemento y el superplastificante son demasiado grande ($VIF > 10$) que evidencia un problema serio de multicolinealidad severa que afecta a la regresión. Por lo tanto, se optará por combinar, eliminar o transformar dichas variables con el objetivo de lograr valores estadísticamente aceptables.

Como primera medida se realizará la combinación del cemento y el aditivo superplastificante ya que la cantidad de aditivo superplastificante se calcula como porcentaje de cemento presente en la mezcla, entonces se crea la nueva variable predictora CemSP, que será la suma de la cantidad de cemento y aditivo superplastificante.

Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

Ecuación de regresión

$$\hat{f}c = 561 + 1.5779 \text{ CemSP} - 3.559 \text{ Agua} + 0.047 \text{ Ag. grueso} - 0.1870 \text{ Ag. fino}$$

Coefficientes

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	561	185	3.03	0.003	
CemSP	1.5779	0.0441	35.75	0.000	2.24
Agua	-3.559	0.314	-11.35	0.000	2.70
Ag. grueso	0.047	0.125	0.37	0.710	1.17
Ag. fino	-0.1870	0.0938	-1.99	0.049	4.23

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
16.1534	96.32%	96.19%	95.99%

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	4	785339	196335	752.44	0.000
CemSP	1	333427	333427	1277.84	0.000
Agua	1	33626	33626	128.87	0.000
Ag. grueso	1	36	36	0.14	0.710
Ag. fino	1	1037	1037	3.97	0.049
Error	115	30007	261		
Falta de ajuste	1	2165	2165	8.87	0.004
Error puro	114	27842	244		
Total	119	815346			

En este ajuste realizado al modelo de regresión se logró que los valores VIF estén dentro de los rangos aceptables de multicolinealidad ($VIF < 5$), es decir que se eliminó la

multicolinealidad de las variables predictoras. Sin embargo, se observa que los valores p de las variables, la mayoría son significativas a excepción de la variable Agregado grueso (Ag. grueso) que tiene un valor $p=0.710$ (no significativa), interpretándose que no hay suficiente evidencia estadística de que la variable tengan efecto en la variable dependiente (Resistencia). Entonces estadísticamente se puede eliminar la variable predictora de Agregado grueso, este proceso no afectará la efectividad del modelo.

Los resultados se muestran a continuación.

Ecuación de regresión

$$\hat{f}'c = 602 + 1.5744 \text{ CemSP} - 3.573 \text{ Agua} - 0.1869 \text{ Ag. fino}$$

Coefficientes

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	602	148	4.06	0.000	
CemSP	1.5744	0.0430	36.61	0.000	2.14
Agua	-3.573	0.310	-11.53	0.000	2.66
Ag. fino	-0.1869	0.0935	-2.00	0.048	4.23

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
16.0933	96.32%	96.22%	96.05%

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	3	785303	261768	1010.70	0.000
CemSP	1	347184	347184	1340.50	0.000
Agua	1	34416	34416	132.88	0.000
Ag. fino	1	1036	1036	4.00	0.048
Error	116	30043	259		
Falta de ajuste	2	2202	1101	4.51	0.013
Error puro	114	27842	244		
Total	119	815346			

Finalmente, después de realizar el análisis estadístico vemos que el modelo se ajusta y cumple con los estadísticos diferenciales y estadísticos de diagnóstico. La ecuación de la regresión lineal múltiple para predecir la resistencia a la compresión se muestra e interpreta a continuación.

Ecuación de regresión

$$f'c = 602 + 1.5744 \text{ CemSP} - 3.573 \text{ Agua} - 0.1869 \text{ Ag. fino}$$

Donde:

f'c: resistencia a la compresión (kg/cm²)

CemSP: cemento + superplastificante (kg/m³)

Agua: contenido de agua (lts/m³)

Ag. fino: agregado fino (kg/m³)

Según la ecuación podemos afirmar que el intercepto o constante es de 602 que no tiene significado físico sino matemático que es necesario para el ajuste del modelo. El término de +1.5744CemSP, nos indica que al aumentar una unidad de cemento más aditivo incrementa la resistencia en 1.5744 kg/cm², esto debido a que existe una mayor reacción de hidratación a mayor contenido de cemento. El término de -3.573Agua, nos indica que al aumentar una unidad de agua disminuye la resistencia en -3.573 kg/cm², esto se entiende que si existe mayor presencia de agua en la mezcla esta se diluye reduciendo su densidad y resistencia. El término de -0.1869Ag. fino, nos indica que al aumentar una unidad de agua disminuye la resistencia en -0.1869 kg/cm², en este caso del agregado fino si se utiliza una cantidad excesiva puede debilitar la mezcla y reducir su resistencia, su alto contenido presente en el concreto autocompactante es para llenar los vacíos y ayudar en la trabajabilidad.

Es importante mencionar que a pesar de que el agregado grueso no resultó estadísticamente significativo no quiere decir que sea irrelevante en el diseño del concreto autocompactante, el agregado grueso es fundamental desde un punto de vista estructural por que contribuye al volumen del concreto, mejora la estabilidad y es esencial para garantizar la

compacidad, durabilidad y trabajabilidad del concreto autocompactante. Además el análisis estadístico indica que en el rango de datos analizados las variaciones de la proporción del agregado grueso no explican cambios significativos en la resistencia a la compresión. Por último, el modelo de regresión lineal posee un coeficiente de determinación $R^2=0.96$, que significa que explica que el 96% de la variación en la resistencia del concreto autocompactante.

Comparaciones de los Valores Previstos y los Valores Experimentales de la Resistencia a la Compresión.

Para validar el desempeño del modelo de regresión propuesto, se realizó la comparación entre los valores observados (experimentales) de resistencia a compresión y los valores previstos por el modelo.

Tabla 101

Comparación de valores experimentales y previstos de la resistencia a la compresión

Briqueta	Valor experimental		Valor previsto		Desviación
	(kg/cm2)	(Mpa)	(kg/cm2)	(Mpa)	
CAC-355-1	261.60	25.65	276.07	27.07	5.53%
CAC-385-1	264.26	25.92	273.92	26.86	3.66%
CAC-420-1	360.73	35.38	369.36	36.22	2.39%
CAC-450-1	369.75	36.26	378.68	37.14	2.41%
CAC-470-1	436.38	42.79	472.01	46.29	8.16%
CAC-500-1	520.19	51.01	474.04	46.49	8.87%
CAC-355-2	297.44	29.17	276.07	27.07	7.18%
CAC-385-2	259.62	25.46	273.92	26.86	5.51%
CAC-420-2	373.67	36.65	369.36	36.22	1.15%
CAC-450-2	362.32	35.53	378.68	37.14	4.51%
CAC-470-2	450.76	44.21	472.01	46.29	4.71%
CAC-500-2	477.87	46.86	474.04	46.49	0.80%
CAC-355-3	255.06	25.01	276.07	27.07	8.24%
CAC-385-3	267.56	26.24	273.92	26.86	2.38%
CAC-420-3	362.23	35.52	369.36	36.22	1.97%
CAC-450-3	384.01	37.66	378.68	37.14	1.39%
CAC-470-3	481.03	47.17	472.01	46.29	1.88%
CAC-500-3	467.66	45.86	474.04	46.49	1.36%
CAC-355-4	260.76	25.57	276.07	27.07	5.87%
CAC-385-4	268.62	26.34	273.92	26.86	1.97%
CAC-420-4	365.35	35.83	369.36	36.22	1.10%

Tabla 102*Comparación de valores experimentales y previstos de la resistencia a la compresión*

CAC-450-4	361.25	35.43	378.68	37.14	4.82%
CAC-470-4	455.45	44.67	472.01	46.29	3.64%
CAC-500-4	464.84	45.59	474.04	46.49	1.98%
CAC-355-5	291.50	28.59	276.07	27.07	5.29%
CAC-385-5	274.36	26.91	273.92	26.86	0.16%
CAC-420-5	369.94	36.28	369.36	36.22	0.16%
CAC-450-5	372.56	36.54	378.68	37.14	1.64%
CAC-470-5	463.27	45.43	472.01	46.29	1.89%
CAC-500-5	470.52	46.14	474.04	46.49	0.75%
CAC-355-6	246.46	24.17	276.07	27.07	12.02%
CAC-385-6	284.21	27.87	273.92	26.86	3.62%
CAC-420-6	393.99	38.64	369.36	36.22	6.25%
CAC-450-6	369.60	36.25	378.68	37.14	2.46%
CAC-470-6	459.06	45.02	472.01	46.29	2.82%
CAC-500-6	434.31	42.59	474.04	46.49	9.15%
CAC-355-7	289.29	28.37	276.07	27.07	4.57%
CAC-385-7	280.47	27.51	273.92	26.86	2.34%
CAC-420-7	372.20	36.50	369.36	36.22	0.76%
CAC-450-7	404.17	39.64	378.68	37.14	6.31%
CAC-470-7	469.79	46.07	472.01	46.29	0.47%
CAC-500-7	489.36	47.99	474.04	46.49	3.13%
CAC-355-8	275.47	27.01	276.07	27.07	0.22%
CAC-385-8	273.47	26.82	273.92	26.86	0.16%
CAC-420-8	385.09	37.77	369.36	36.22	4.09%
CAC-450-8	394.97	38.73	378.68	37.14	4.13%
CAC-470-8	480.82	47.15	472.01	46.29	1.83%
CAC-500-8	478.84	46.96	474.04	46.49	1.00%
CAC-355-9	258.34	25.33	276.07	27.07	6.86%
CAC-385-9	268.23	26.30	273.92	26.86	2.12%
CAC-420-9	377.69	37.04	369.36	36.22	2.21%
CAC-450-9	384.65	37.72	378.68	37.14	1.55%
CAC-470-9	474.58	46.54	472.01	46.29	0.54%
CAC-500-9	456.68	44.79	474.04	46.49	3.80%
CAC-355-10	266.09	26.09	276.07	27.07	3.75%
CAC-385-10	277.13	27.18	273.92	26.86	1.16%
CAC-420-10	375.56	36.83	369.36	36.22	1.65%
CAC-450-10	378.24	37.09	378.68	37.14	0.12%
CAC-470-10	473.48	46.43	472.01	46.29	0.31%
CAC-500-10	482.08	47.28	474.04	46.49	1.67%
CAC-355-11	273.31	26.80	276.07	27.07	1.01%
CAC-385-11	287.54	28.20	273.92	26.86	4.74%
CAC-420-11	342.07	33.55	369.36	36.22	7.98%
CAC-450-11	396.40	38.87	378.68	37.14	4.47%
CAC-470-11	487.10	47.77	472.01	46.29	3.10%

Tabla 103*Comparación de valores experimentales y previstos de la resistencia a la compresión*

CAC-500-11	464.83	45.58	474.04	46.49	1.98%
CAC-355-12	263.24	25.82	276.07	27.07	4.88%
CAC-385-12	291.85	28.62	273.92	26.86	6.14%
CAC-420-12	377.36	37.01	369.36	36.22	2.12%
CAC-450-12	405.76	39.79	378.68	37.14	6.67%
CAC-470-12	458.37	44.95	472.01	46.29	2.98%
CAC-500-12	465.68	45.67	474.04	46.49	1.80%
CAC-355-13	301.95	29.61	276.07	27.07	8.57%
CAC-385-13	258.61	25.36	273.92	26.86	5.92%
CAC-420-13	382.69	37.53	369.36	36.22	3.48%
CAC-450-13	432.19	42.38	378.68	37.14	12.38%
CAC-470-13	447.17	43.85	472.01	46.29	5.55%
CAC-500-13	472.71	46.36	474.04	46.49	0.28%
CAC-355-14	294.95	28.93	276.07	27.07	6.40%
CAC-385-14	264.98	25.99	273.92	26.86	3.37%
CAC-420-14	381.98	37.46	369.36	36.22	3.30%
CAC-450-14	356.59	34.97	378.68	37.14	6.19%
CAC-470-14	482.80	47.35	472.01	46.29	2.24%
CAC-500-14	498.93	48.93	474.04	46.49	4.99%
CAC-355-15	279.50	27.41	276.07	27.07	1.23%
CAC-385-15	267.53	26.24	273.92	26.86	2.39%
CAC-420-15	368.85	36.17	369.36	36.22	0.14%
CAC-450-15	380.01	37.27	378.68	37.14	0.35%
CAC-470-15	466.85	45.78	472.01	46.29	1.10%
CAC-500-15	469.30	46.02	474.04	46.49	1.01%
CAC-355-16	266.00	26.09	276.07	27.07	3.79%
CAC-385-16	275.17	26.99	273.92	26.86	0.45%
CAC-420-16	394.77	38.71	369.36	36.22	6.44%
CAC-450-16	393.10	38.55	378.68	37.14	3.67%
CAC-470-16	473.19	46.40	472.01	46.29	0.25%
CAC-500-16	465.59	45.66	474.04	46.49	1.82%
CAC-355-17	272.32	26.71	276.07	27.07	1.38%
CAC-385-17	259.82	25.48	273.92	26.86	5.43%
CAC-420-17	369.76	36.26	369.36	36.22	0.11%
CAC-450-17	395.88	38.82	378.68	37.14	4.35%
CAC-470-17	477.21	46.80	472.01	46.29	1.09%
CAC-500-17	433.59	42.52	474.04	46.49	9.33%
CAC-355-18	263.76	25.87	276.07	27.07	4.67%
CAC-385-18	258.55	25.36	273.92	26.86	5.94%
CAC-420-18	368.67	36.15	369.36	36.22	0.19%
CAC-450-18	384.90	37.75	378.68	37.14	1.62%
CAC-470-18	477.08	46.79	472.01	46.29	1.06%
CAC-500-18	487.76	47.83	474.04	46.49	2.81%
CAC-355-19	304.25	29.84	276.07	27.07	9.26%

Tabla 104*Comparación de valores experimentales y previstos de la resistencia a la compresión*

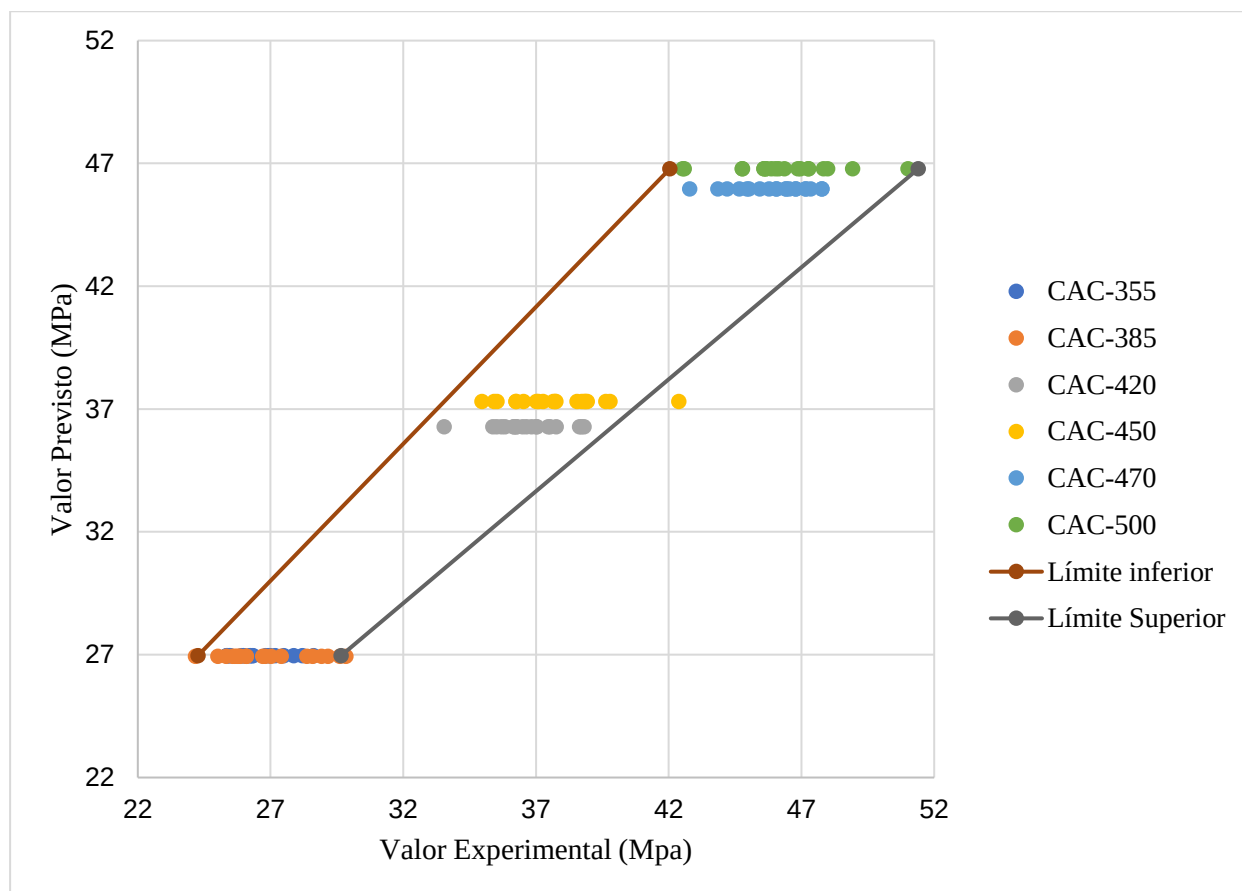
CAC-385-19	264.98	25.99	273.92	26.86	3.37%
CAC-420-19	395.82	38.82	369.36	36.22	6.69%
CAC-450-19	377.49	37.02	378.68	37.14	0.31%
CAC-470-19	469.61	46.05	472.01	46.29	0.51%
CAC-500-19	481.84	47.25	474.04	46.49	1.62%
CAC-355-20	262.49	25.74	276.07	27.07	5.18%
CAC-385-20	258.95	25.39	273.92	26.86	5.78%
CAC-420-20	364.05	35.70	369.36	36.22	1.46%
CAC-450-20	397.05	38.94	378.68	37.14	4.63%
CAC-470-20	487.10	47.77	472.01	46.29	3.10%
CAC-500-20	456.53	44.77	474.04	46.49	3.84%

Nota. Fuente: Elaboración Propia

En el gráfico siguiente se observa la comparación de los valores previstos y valores experimentales, apreciando que los valores experimentales oscilan aproximadamente en un $\pm 10\%$ alrededor del valor predicho, lo que refuerza la confiabilidad del modelo en el rango de datos analizados, haciendo útil la herramienta predictiva sin comprometer la interpretación física.

Gráfica 35

Valores previstos y experimentales de la resistencia a la compresión



x_3 : agregado grueso (kg/m^3)
 x_4 : agregado fino (kg/m^3)
 x_5 : superplastificante (kg/m^3)
 a : coeficiente de regresión parcial del cemento
 b : coeficiente de regresión parcial del agua
 c : coeficiente de regresión parcial del agregado grueso
 d : coeficiente de regresión parcial del agregado fino
 e : coeficiente de regresión del superplastificante

En la siguiente tabla se muestran los datos de la resistencia a la flexión (módulo de rotura) a diferentes dosificaciones con las que se elaboró la ecuación y análisis mediante el software estadístico Minitab.

Tabla 105

Resultados de las observaciones de la resistencia a la flexión en laboratorio del concreto autocompactante

X1	X2	X3	X4	X5	Y
355	202.35	807.46	886.90	2.49	56.22
385	219.45	769.09	823.73	2.43	48.47
420	205.80	775.49	878.15	3.53	20.74(*)
450	220.50	793.07	798.71	3.38	57.36
470	202.10	777.08	823.95	3.90	79.61
500	215.00	781.88	820.02	4.00	70.38
355	202.35	807.46	886.90	2.49	52.48
385	219.45	769.09	823.73	2.43	47.89
420	205.80	775.49	878.15	3.53	53.66
450	220.50	793.07	798.71	3.38	54.66
470	202.10	777.08	823.95	3.90	68.50
500	215.00	781.88	820.02	4.00	71.30
355	202.35	807.46	886.90	2.49	65.62
385	219.45	769.09	823.73	2.43	48.30
420	205.80	775.49	878.15	3.53	55.70
450	220.50	793.07	798.71	3.38	55.11
470	202.10	777.08	823.95	3.90	75.94
500	215.00	781.88	820.02	4.00	60.37
355	202.35	807.46	886.90	2.49	61.25
385	219.45	769.09	823.73	2.43	51.51
420	205.80	775.49	878.15	3.53	53.74
450	220.50	793.07	798.71	3.38	57.83
470	202.10	777.08	823.95	3.90	68.64
500	215.00	781.88	820.02	4.00	66.88

Tabla 106

Resultados de las observaciones de la resistencia a la flexión en laboratorio del concreto autocompactante

355	202.35	807.46	886.90	2.49	55.97
385	219.45	769.09	823.73	2.43	55.66
420	205.80	775.49	878.15	3.53	55.41
450	220.50	793.07	798.71	3.38	77.80(*)
470	202.10	777.08	823.95	3.90	73.11
500	215.00	781.88	820.02	4.00	80.33
355	202.35	807.46	886.90	2.49	53.82
385	219.45	769.09	823.73	2.43	55.24
420	205.80	775.49	878.15	3.53	54.48
450	220.50	793.07	798.71	3.38	55.83
470	202.10	777.08	823.95	3.90	65.14
500	215.00	781.88	820.02	4.00	66.21
355	202.35	807.46	886.90	2.49	57.94
385	219.45	769.09	823.73	2.43	47.83
420	205.80	775.49	878.15	3.53	51.52
450	220.50	793.07	798.71	3.38	57.96
470	202.10	777.08	823.95	3.90	66.48
500	215.00	781.88	820.02	4.00	68.33
355	202.35	807.46	886.90	2.49	51.14
385	219.45	769.09	823.73	2.43	49.98
420	205.80	775.49	878.15	3.53	53.11
450	220.50	793.07	798.71	3.38	55.66
470	202.10	777.08	823.95	3.90	65.16
500	215.00	781.88	820.02	4.00	71.49
355	202.35	807.46	886.90	2.49	54.81
385	219.45	769.09	823.73	2.43	53.43
420	205.80	775.49	878.15	3.53	52.31
450	220.50	793.07	798.71	3.38	54.87
470	202.10	777.08	823.95	3.90	67.23
500	215.00	781.88	820.02	4.00	74.77
355	202.35	807.46	886.90	2.49	56.41
385	219.45	769.09	823.73	2.43	50.33
420	205.80	775.49	878.15	3.53	54.03
450	220.50	793.07	798.71	3.38	56.11
470	202.10	777.08	823.95	3.90	69.69
500	215.00	781.88	820.02	4.00	71.05

Nota. (*) datos atípicos Fuente: Elaboración Propia

A continuación, se muestra los resultados obtenidos del análisis estadístico de regresión lineal múltiple obtenidos mediante el Software estadístico Minitab para predecir el módulo de rotura.

Ecuación de regresión

$$fr = 64.2 + 0.4155 \text{ Cemento} - 0.909 \text{ Agua} + 0.1074 \text{ Ag. grueso} - 0.0026 \text{ Ag. fino} - 22.35 \text{ SP}$$

Coefficientes

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	64.2	76.4	0.84	0.404	
Cemento	0.4155	0.0877	4.74	0.000	54.44
Agua	-0.909	0.145	-6.28	0.000	3.72
Ag. grueso	0.1074	0.0495	2.17	0.034	1.19
Ag. fino	-0.0026	0.0475	-0.05	0.957	6.87
SP	-22.35	6.10	-3.66	0.001	42.19

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
4.47099	74.51%	72.06%	68.42%

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	5	3039.10	607.821	30.41	0.000
Cemento	1	448.41	448.414	22.43	0.000
Agua	1	787.14	787.145	39.38	0.000
Ag. grueso	1	94.25	94.250	4.71	0.034
Ag. fino	1	0.06	0.059	0.00	0.957
SP	1	268.05	268.050	13.41	0.001
Error	52	1039.47	19.990		
Total	57	4078.57			

Al igual que en el análisis estadístico realizado para la resistencia a la compresión se puede observar que los valores VIF de las variables predictores del cemento y el superplastificante son demasiado grandes ($VIF > 10$) que evidencia un problema serio de multicolinealidad severa que afecta a la regresión. Por lo tanto, se optará nuevamente por

combinar, eliminar o transformar dichas variables con el objetivo de lograr valores estadísticamente aceptables.

Se realizará la combinación del cemento y el aditivo superplastificante ya que la cantidad del superplastificante se calcula como porcentaje de cemento presente en la mezcla, entonces se crea la nueva variable predictora CemSP, que será la suma de la cantidad de cemento y aditivo superplastificante.

Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

Ecuación de regresión

$$fr = 142.9 + 0.0995 \text{ CemSP} - 0.635 \text{ Agua} + 0.1261 \text{ Ag. grueso} - 0.1087 \text{ Ag. fino}$$

Coefficientes

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	142.9	81.6	1.75	0.086	
CemSP	0.0995	0.0198	5.02	0.000	2.30
Agua	-0.635	0.138	-4.60	0.000	2.74
Ag. grueso	0.1261	0.0547	2.30	0.025	1.18
Ag. fino	-0.1087	0.0420	-2.59	0.012	4.34

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
4.97145	67.88%	65.46%	61.86%

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	4	2768.7	692.16	28.01	0.000
CemSP	1	623.8	623.77	25.24	0.000
Agua	1	522.2	522.24	21.13	0.000
Ag. grueso	1	131.2	131.17	5.31	0.025
Ag. fino	1	165.5	165.52	6.70	0.012
Error	53	1309.9	24.72		
Falta de ajuste	1	270.4	270.44	13.53	0.001
Error puro	52	1039.5	19.99		
Total	57	4078.6			

Realizando el ajuste al modelo de regresión se logró que los valores VIF están dentro de los rangos aceptables de multicolinealidad ($VIF < 5$), es decir que se eliminó la multicolinealidad de las variables predictoras, además se observa que los valores p de las variables predictoras todas con significativas es decir que tienen efecto en la variable de respuesta.

Finalmente, podemos afirmar que son correctos los estadísticos diferenciales y estadísticos de diagnóstico del modelo. La ecuación de la regresión lineal múltiple para predecir la resistencia a la flexión (módulo de rotura) se interpreta y muestra a continuación.

Ecuación de regresión

$$fr = 142.9 + 0.0995 \text{ CemSP} - 0.635 \text{ Agua} + 0.1261 \text{ Ag. grueso} - 0.1087 \text{ Ag. fino}$$

Donde:

fr: módulo de rotura (kg/cm^2)

CemSP: cemento + superplastificante (kg/m^3)

Agua: contenido de agua (lts/m^3)

Ag. grueso: agregado grueso (kg/m^3)

Ag. fino: agregado fino (kg/m^3)

De la ecuación podemos afirmar que el intercepto o constante es de 142.9 que no tiene significado físico sino matemático que es necesario para el ajuste del modelo. El término de $+0.0995\text{CemSP}$, nos indica que al aumentar una unidad de cemento más aditivo incrementa el módulo de rotura en 0.0995 kg/cm^2 , esto debido a que existe una mayor reacción de hidratación cuando existe mayor contenido de cemento. El término de -0.635Agua , nos indica que al aumentar una unidad de agua disminuye la resistencia en -0.635 kg/cm^2 , esto debido a que si existe mayor presencia de agua en la mezcla esta se diluye reduciendo su densidad y resistencia. El término de $+0.1261\text{Ag.grueso}$, nos indica que aporta positivamente al módulo de rotura, proporcionan mejor capacidad estructural. El término de -0.1087Ag. fino , nos indica que al aumentar una unidad de agua disminuye la resistencia en -0.1087 kg/cm^2 , en el caso del agregado fino en una cantidad excesiva puede debilitar la mezcla y reducir levemente su

resistencia, su alto contenido en el concreto autocompactante es llenar los vacíos y ayudar en la trabajabilidad.

El modelo de regresión lineal posee un coeficiente de determinación $R^2=0.68$, que significa que explica que el 68% de la variación en la resistencia del concreto autocompactante. Aunque este valor no es extremadamente alto, es aceptable considerando que la resistencia a la flexión presenta mayor dispersión natural. además, todos los coeficientes del modelo son estadísticamente significativos (valores $p<0.05$) y sus signos son físicamente coherentes, lo que lo respalda como herramienta de predicción para la evaluación de tendencia y comparar formulaciones de mezcla.

Comparaciones de los Valores Previstos y los Valores Experimentales de la Resistencia a la Flexión.

Tabla 107

Comparación de valores experimentales y previstos de la resistencia a la flexión

Vigueta	Valor experimental		Valor previsto		Desviación
	(kg/cm2)	(Mpa)	(kg/cm2)	(Mpa)	(%)
CAC-355-1	56.22	5.51	55.39	5.43	1.47%
CAC-385-1	48.47	4.75	49.54	4.86	2.21%
CAC-450-1	57.36	5.63	61.18	6.00	6.66%
CAC-470-1	79.61	7.81	70.15	6.88	11.89%
CAC-500-1	70.38	6.90	65.98	6.47	6.25%
CAC-355-2	52.48	5.15	55.39	5.43	5.55%
CAC-385-2	47.89	4.70	49.54	4.86	3.45%
CAC-420-2	53.66	5.26	56.69	5.56	5.65%
CAC-450-2	54.66	5.36	61.18	6.00	11.93%
CAC-470-2	68.5	6.72	70.15	6.88	2.40%
CAC-500-2	71.3	6.99	65.98	6.47	7.46%
CAC-355-3	65.62	6.44	55.39	5.43	15.59%
CAC-385-3	48.3	4.74	49.54	4.86	2.57%
CAC-420-3	55.7	5.46	56.69	5.56	1.78%
CAC-450-3	55.11	5.40	61.18	6.00	11.01%
CAC-470-3	75.94	7.45	70.15	6.88	7.63%
CAC-500-3	60.37	5.92	65.98	6.47	9.30%
CAC-355-4	61.25	6.01	55.39	5.43	9.56%
CAC-385-4	51.51	5.05	49.54	4.86	3.82%
CAC-420-4	53.74	5.27	56.69	5.56	5.49%
CAC-450-4	57.83	5.67	61.18	6.00	5.79%

Tabla 108*Comparación de valores experimentales y previstos de la resistencia a la flexión*

CAC-470-4	68.64	6.73	70.15	6.88	2.19%
CAC-500-4	66.88	6.56	65.98	6.47	1.34%
CAC-355-5	55.97	5.49	55.39	5.43	1.03%
CAC-385-5	55.66	5.46	49.54	4.86	10.99%
CAC-420-5	55.41	5.43	56.69	5.56	2.31%
CAC-470-5	73.11	7.17	61.18	6.00	16.32%
CAC-500-5	80.33	7.88	70.15	6.88	12.68%
CAC-355-6	53.82	5.28	55.39	5.43	2.92%
CAC-385-6	55.24	5.42	49.54	4.86	10.32%
CAC-420-6	54.48	5.34	56.69	5.56	4.06%
CAC-450-6	55.83	5.48	61.18	6.00	9.58%
CAC-470-6	65.14	6.39	70.15	6.88	7.68%
CAC-500-6	66.21	6.49	65.98	6.47	0.34%
CAC-355-7	57.94	5.68	55.39	5.43	4.40%
CAC-385-7	47.83	4.69	49.54	4.86	3.58%
CAC-420-7	51.52	5.05	56.69	5.56	10.04%
CAC-450-7	57.96	5.68	61.18	6.00	5.56%
CAC-470-7	66.48	6.52	70.15	6.88	5.51%
CAC-500-7	68.33	6.70	65.98	6.47	3.44%
CAC-355-8	51.14	5.02	55.39	5.43	8.32%
CAC-385-8	49.98	4.90	49.54	4.86	0.88%
CAC-420-8	53.11	5.21	56.69	5.56	6.75%
CAC-450-8	55.66	5.46	61.18	6.00	9.92%
CAC-470-8	65.16	6.39	70.15	6.88	7.65%
CAC-500-8	71.49	7.01	65.98	6.47	7.70%
CAC-355-9	54.81	5.38	55.39	5.43	1.06%
CAC-385-9	53.43	5.24	49.54	4.86	7.28%
CAC-420-9	52.31	5.13	56.69	5.56	8.38%
CAC-450-9	54.87	5.38	61.18	6.00	11.50%
CAC-470-9	67.23	6.59	70.15	6.88	4.34%
CAC-500-9	74.77	7.33	65.98	6.47	11.75%
CAC-355-10	56.41	5.53	55.39	5.43	1.80%
CAC-385-10	50.33	4.94	49.54	4.86	1.57%
CAC-420-10	54.03	5.30	56.69	5.56	4.93%
CAC-450-10	56.11	5.50	61.18	6.00	9.04%
CAC-470-10	69.69	6.83	70.15	6.88	0.65%
CAC-500-10	71.05	6.97	65.98	6.47	7.13%

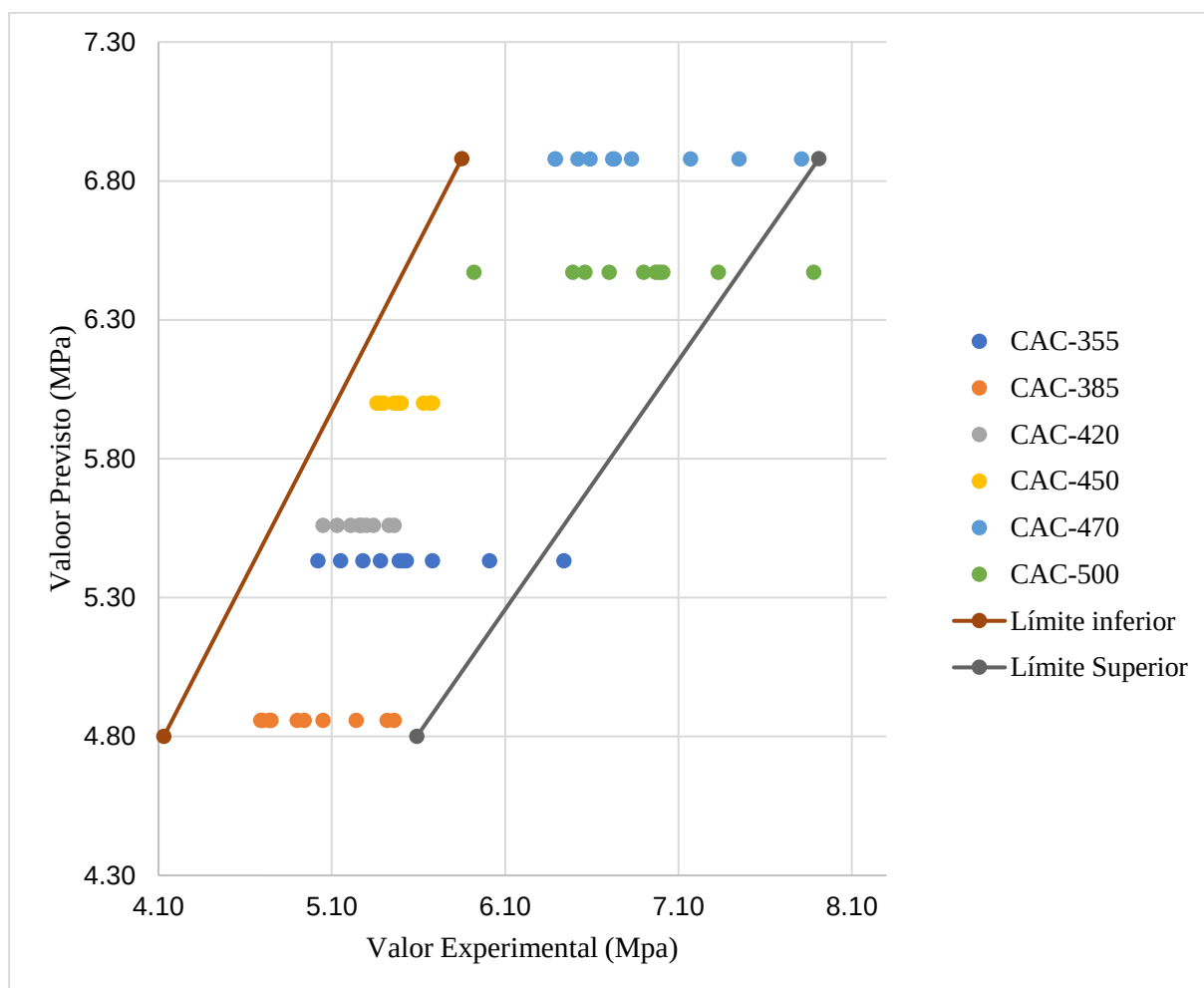
Nota. Fuente: Elaboración Propia

En el gráfico siguiente se observa la comparación de valores previstos y valores experimentales, apreciando que los valores experimentales oscilan aproximadamente en un $\pm 15\%$ alrededor del valor predicho, se puede observar que se tiene mayor tolerancia en este

caso de la predicción de módulo de rotura, esto puede ser debido a la alta variabilidad que se tuvo en los ensayos.

Gráfica 36

Valores previstos y experimentales de la resistencia a la flexión



Nota. Fuente: Elaboración Propia

Discusión de Resultados en el Contexto de Investigaciones Anteriores

El modelo de predicción para la resistencia a la compresión mostro una alta capacidad predictiva, con un coeficiente de determinación de $R^2=0.96$, que nos indica que las variables incluidas explican en gran medida la variabilidad en resistencia a la compresión. Este nivel de predicción es comparable con el obtenido por Gadve & Jajodia (2022), quienes alcanzaron un $R^2=0.97$ al predecir la resistencia a la compresión en el concreto simple, utilizando también modelos de regresión lineal múltiple. Esto indica que, si bien las características del concreto autocompactante son diferentes del concreto convencional, el tratamiento estadístico sigue siendo eficaz.

Por otro lado, difiere significativamente con lo reportado por Carrasco (2020), quien al aplicar la regresión lineal múltiple a concretos convencionales y autocompactantes encontró coeficientes de determinación bajos entre 21.9% y 38.7%. Una posible causa de la diferencia es la inclusión de variables redundantes o pocos significativas; además de no controlar la multicolinealidad. En el presente estudio se mitigó esa situación al agrupar las variables cemento y superplastificante en una sola (CemSP), lo que redujo la interferencia estadística y mejoró la consistencia del modelo.

También se comprobó que el agregado grueso no fue una variable estadísticamente significativa para la predicción de la resistencia a la compresión, este resultado concuerda con las observaciones de Carrasco (2020), quien también encontró baja correlación entre esta variable y la resistencia, especialmente en concretos autocompactantes. Esto refuerza la noción de que en este tipo de concretos especiales las propiedades de la pasta (cemento, agua y aditivos) tiene una mayor influencia en la resistencia final que los componentes granulares.

Es importante mencionar que las mezclas ensayadas cumplieron con los criterios de autocompactabilidad establecidos por la EFNARC, lo que valida que los resultados del modelo

están asociados específicamente al comportamiento de concretos autocompactantes y no de mezclas convencionales. Eso es relevante si se considera lo señalado por Silva et al. (2018) y Gonzales et al. (2005), quienes destacan que la autocompactabilidad modifica aspectos de la mezcla como la trabajabilidad y cohesión, lo cual puede tener efectos sobre el desarrollo de resistencia mecánicas.

En cuanto a la resistencia a la flexión, el modelo de regresión presentó una capacidad predictiva, con $R^2=0.68$, aunque menor que en el caso de la resistencia a la compresión, este resultado es aceptable en estudios experimentales, especialmente si se considera que la flexión es una propiedad más variable del concreto. El valor de R^2 es similar al obtenido por Gatia Caiza et al. (2025), quienes desarrollaron un modelo con múltiples variables y alcanzaron un coeficiente de determinación de $R^2=0.79$. Esta diferencia puede explicarse por la mayor cantidad de variables consideradas en este estudio, que incluyeron propiedades físicas y mecánicas de los agregados, edad del concreto y otras.

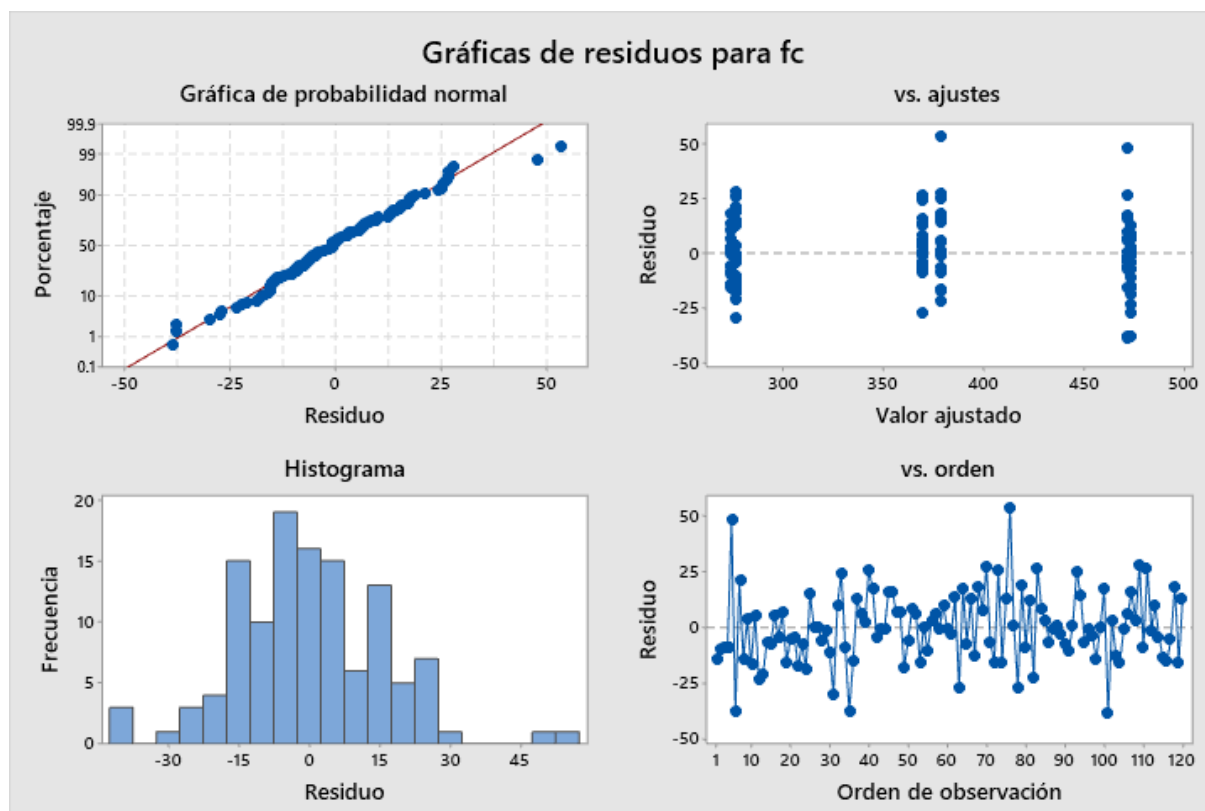
A diferencia del modelo de compresión, aquí el agregado grueso si fue una variable significativa, lo cual puede explicarse por el comportamiento del concreto ante cargas de flexión, donde el esqueleto granular puede tener una participación más directa, esto también concuerda por Silva et al. (2018), quienes incluyeron términos de interacción entre componentes sólidos para mejorar la predicción de la resistencia.

Gráficas de Residuos de los Modelos de Regresión

La validación del modelo de regresión lineal múltiple desarrollado para predecir la resistencia a la compresión se realizó mediante el análisis gráfico de residuos, considerando los criterios de normalidad, homocedasticidad e independencia.

Gráfica 37

Gráficas de residuos de la resistencia a la compresión



Nota. Fuente: Elaboración Propia

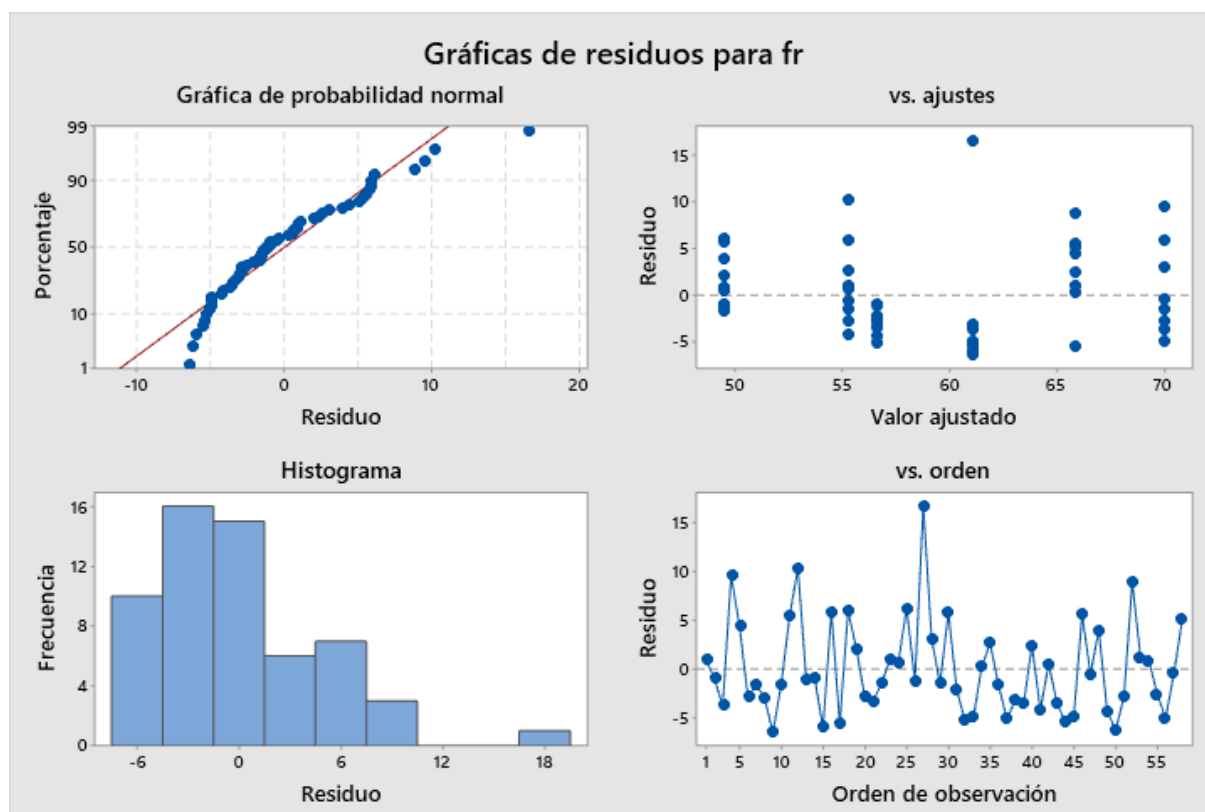
En la gráfica se muestra que los residuos se alinean muy cercanamente a la línea de referencia, lo que indica que los residuos siguen aproximadamente una distribución normal, esta observación es reforzada con el histograma de residuos donde se presenta una distribución simétrica con una ligera dispersión, sin valores atípicos excesivos.

La grafica de residuos versus valores ajustados se observa una distribución aleatoria de los puntos alrededor del eje cero, lo que da a conocer que no existe presencia de heterocedasticidad evidente y que la varianza de errores es constante. Además, la gráfica de residuos vs el orden de observación no muestra patrones sistemáticos, lo que indica independencia entre los errores. Por otro lado, el coeficiente de determinación es de $R^2=0.96$, este valor sumado a la validación gráfica de los supuestos, demuestra que el modelo de regresión es altamente preciso y estadísticamente válido.

Del mismo modo se realizó el análisis gráfico de residuos del modelo para la resistencia a la flexión.

Gráfica 38

Gráficas de residuos de la resistencia a la flexión (módulo de rotura)



Nota. Fuente: Elaboración Propia

La grafica de probabilidad normal muestra un comportamiento aceptable, aunque con ligeras desviaciones en los extremos, lo cual indica una leve desviación de la normalidad. Sin embargo, en general los residuos siguen una tendencia razonablemente cercana a una distribución normal.

El histograma de residuos, presenta cierta asimetría, no evidencia una concentración excesiva de valores extremos ni multicolinealidad (valor de la prueba de Durbin-Watson es de 1.857), por lo que puede considerarse aceptable. La grafica de residuos frente a los valores ajustados no presenta una tendencia clara de heterocedasticidad (varianza no constante). La

gráfica de residuos versus orden de observación no muestra patrones sistemáticos ni tendencias temporales, lo que sugiere que los errores son independientes entre sí y no presentan correlación con el orden de las mediciones, cumpliendo con el supuesto de independencia de los errores. En conjunto estos resultados cumplen con los principales supuestos de la regresión lineal múltiple.

Por tanto, aunque el modelo para la resistencia a la flexión (módulo de rotura) presenta una precisión moderada $R^2=0.68$, se considera estadísticamente válido. Esto permite utilizarlo como una herramienta preliminar para estimar la resistencia a la flexión del concreto autocompactante, reconociendo que su capacidad predictiva podría mejorarse con una base de datos experimental más amplia o con la inclusión de variables adicionales.

Capítulo VI

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

Se desarrollaron los modelos de regresión lineal múltiple para predecir las propiedades mecánicas del concreto autocompactante, considerando como variables predictoras las proporciones de sus componentes. Los modelos demostraron una capacidad predictiva adecuada, presentando coeficientes coherentes con el comportamiento físico del concreto, tanto en términos de magnitud como de signo.

Asimismo, todas las mezclas evaluadas cumplieron satisfactoriamente con los criterios de autocompactabilidad establecidos por las normas ACI 237R-07 y EFNARC, validando su comportamiento reológico como concreto autocompactante.

CE1: Se desarrolló un modelo de regresión lineal múltiple para predecir la resistencia a la compresión a los 28 días, en función de sus componentes del concreto autocompactante. Aunque el agregado grueso no resultó estadísticamente significativo ($p > 0.05$) dentro del rango evaluado, su exclusión no implica irrelevancia en el diseño de mezcla, ya que desempeña un rol importante en la estabilidad volumétrica y trabajabilidad.

El modelo alcanzo un coeficiente de determinación R^2 de 0.96, reflejando un excelente ajuste. Para mejorar la robustez estadística y reducir la multicolinealidad, se incorporó una nueva variable predictora denominada CemSP, que representa la suma del contenido de cemento y superplastificante (kg/m^3). La ecuación obtenida es:

Ecuación de regresión para la resistencia a la compresión

$$f'_c = 602 + 1.5744 \text{ CemSP} - 3.573 \text{ Agua} - 0.1869 \text{ Ag. fino}$$

donde:

CemSP: cemento + superplastificante (kg/m^3)

Agua: contenido de agua (lts/m³)

Ag. fino: contenido de agregado fino (kg/m³)

f'c: resistencia a la compresión (kg/cm²)

Esta ecuación es aplicable exclusivamente a mezclas elaboradas con los mismos materiales utilizados en esta investigación, siempre que se garantice el cumplimiento de los criterios de autocompactabilidad establecidos por la EFNARC.

CE2: Se desarrollo un modelo de regresión lineal múltiple para predecir la resistencia a la flexión (módulo de rotura) del concreto autocompactante a los 28 días. Para mejorar la estabilidad del modelo y evitar la multicolinealidad, se empleó la variable combinada CemSP, sin comprometer la interpretación técnica.

El modelo alcanzó un coeficiente de determinación R² de 0.68, valor aceptable considerando la mayor variabilidad inherente a la resistencia a la flexión. Todos los coeficientes del modelo fueron estadísticamente significativos (p<0.05) y sus signos se alinearon con el comportamiento físico del concreto. La ecuación obtenida es:

Ecuación de regresión para la resistencia a la flexión

$$fr = 142.9 + 0.0995 \text{ CemSP} - 0.635 \text{ Agua} + 0.1261 \text{ Ag. grueso} - 0.1087 \text{ Ag. fino}$$

donde:

CemSP: cemento + superplastificante (kg/m³)

Agua: contenido de agua (lts/m³)

Ag. fino: contenido de agregado fino (kg/m³)

Ag. grueso: contenido de agregado grueso (kg/m³)

fr: módulo de rotura (kg/cm²)

Esta ecuación es aplicable únicamente para mezclas formuladas con los materiales de esta investigación, cumpliendo las condiciones de autocompactabilidad exigidas por la EFNARC.

CE3: Los modelos permitieron identificar el peso predictivo relativo de cada variable predictora. En el modelo de compresión, la variable CemSP presentó un efecto positivo sobre la resistencia, mientras que el contenido de agua y el agregado fino mostraron influencia negativa, coherente con el comportamiento esperado del concreto autocompactante.

En cuanto a la resistencia a la flexión (módulo de rotura), el agregado grueso tuvo un efecto positivo, mientras que el agua y el agregado fino afectaron negativamente. Todos los coeficientes fueron estadísticamente significativos ($p < 0.05$), lo cual respalda la validez estadística y técnica de los modelos.

CE4: La validación estadística mediante el análisis gráfico de los residuos confirmó el cumplimiento de los principales supuestos de regresión: normalidad, homocedasticidad e independencia de los errores.

El modelo de compresión ($R^2=0.96$), los residuos no presentaron patrones sistemáticos ni indicios de heterocedasticidad, lo que respalda su robustez estadística. Para el modelo de flexión ($R^2=0.68$), aunque se observaron ligeras desviaciones respecto a la normalidad y mayor dispersión, no se identificaron problemas evidentes de heterocedasticidad ni autocorrelación. en consecuencia, este modelo puede ser utilizado como herramienta de estimación preliminar, con menor precisión que el modelo de compresión.

En conjunto, ambos modelos constituyen herramientas útiles para la predicción del comportamiento mecánico del concreto autocompactante a partir de sus proporciones de sus componentes.

Recomendaciones

Antes de aplicar los modelos desarrollados en condiciones distintas a las de este estudio, se recomienda validarlos utilizando nuevos conjuntos de datos que incluyan variaciones en las propiedades de los materiales, condiciones ambientales y métodos de preparación. Esto permitiría evaluar la robustez, confiabilidad y extrapolabilidad del modelo en diferentes escenarios.

Los modelos de regresión obtenidos pueden ser utilizados como herramientas de apoyo en la etapa preliminar del diseño de mezclas de concreto autocompactante, especialmente cuando se requiere optimizar proporciones para alcanzar una resistencia específica. No obstante, se recomienda complementarlos con ensayos experimentales bajo condiciones locales para asegurar su aplicabilidad.

Dado que los modelos se desarrollaron con materiales específicos, se sugiere realizar estudios adicionales que incluyan otros tipos de agregados, cementos y aditivos disponibles en el mercado local, a fin de ampliar la aplicabilidad del modelo y generar formulaciones más representativas de diferentes entornos constructivos.

Bibliografía

- American Concrete Institute. (2007). *ACI 237R-07: Self-consolidating concrete* (Report No. 237R-07). American Concrete Institute.
- ASTM International. (2021). *ASTM C1611/C1611M-21: Standard test method for slump flow of self-consolidating concrete*. https://www.astm.org/c1611_c1611m-21.htm
- Baca, C., & Vela, L. (2020). *Evaluación de las propiedades mecánicas de un concreto autocompactante adicionando fibras sintéticas Sikacem ®-1 Fiber- Cusco 2019*. [Tesis de licenciatura, Universidad Andina del Cusco]. Repositorio Institucional UAC. <https://repositorio.uandina.edu.pe/item/12578b76-3c26-4115-945c-8a2795c97423>
- Beaver, M., Mendenhall, B., & Beaver, B. (2006). *Introducción a la probabilidad y estadística*. 13ava Edición. Editorial Cengage Learning.
- Burón, M., Fernández, J., & Garrido, L. (2006). Hormigón autocompactante. Criterios para su utilización. *Cemento y Hormigón*, (887) 52–64. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1958449>
- Castillo A. (2009). *Tecnología del concreto (teoría y problemas)*. 9na Edición. Editorial San Marcos.
- Carrasco, J. (2020). *Modelos predictivos aplicados a la resistencia a compresión del hormigón de un proyecto hidroeléctrico en Ecuador* [Tesis de máster, Universitat Politècnica de València]. Repositorio Institucional UPV. <https://riunet.upv.es/handle/10251/155554>
- Correia P, & Rodrigues A. (2009). *Métodos de dosagem de concreto autoadensável*. Editorial Pini Ltda.
- Devore J. (2008). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. 7ma Edición. Editorial Cengage Learning.

- Domone, P. L. (2006). Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies. *Cement and Concrete Composites*, 28(2), 197–208.
- European Project Group on SCC. (2005). *The European guidelines for self-compacting concrete: Specification, production and use*. SCC European Project Group. <https://www.efnarc.org/pdf/SCCGuidelinesMay2005.pdf>
- Gadve, S., & Jajodia, R. (2022). Desarrollo de modelos estadísticos para la predicción de propiedades mecánicas del hormigón simple. *Informes de La Construcción*, 74(566), e440. <https://doi.org/10.3989/ic.83314>
- Gatia Caiza, A. N., Viscaíno Cuzco, M., & Villacrés Parra, S. (2025). Predicción de la resistencia a compresión del hormigón simple usando un modelo de regresión lineal múltiple. *AlfaPublicaciones*, 7(2.1), 6–31. <https://doi.org/10.33262/ap.v7i2.1.604>
- González, S., Landaverde, A., & Romero, C. (2005). *Concreto autocompactable: propuesta para el diseño de mezcla. beneficios técnicos y consideraciones básicas para su implemento en El Salvador*. [Tesis de licenciatura, Universidad de El Salvador]. Repositorio Institucional UES. <https://repositorio.ues.edu.sv/items/20b3c09d-3589-4407-83e2-5817aaed0acf>
- Instituto Nacional de Calidad. (2008). *NTP 339.034: Concreto. Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto, en muestras cilíndricas*.
- Instituto Nacional de Calidad. (2012). *NTP 339.078: Concreto. Método de ensayo para determinar la resistencia a la flexión del concreto en vigas simplemente apoyadas con cargas a los tercios del tramo*.

- Instituto Nacional de Calidad. (2013). *NTP 339.183: Concreto. Práctica normalizada para la elaboración y curado de especímenes de concreto en el laboratorio.*
- Instituto Nacional de Calidad. (2013). *NTP 339.183: Concreto. Práctica normalizada para la elaboración y curado de especímenes de concreto en el laboratorio.*
- Instituto Nacional de Calidad. (2002). *NTP 339.185: Agregados. Método de ensayo normalizado para contenido de humedad total evaporable de agregados por secado.*
- Instituto Nacional de Calidad. (2011). *NTP 400.010: Agregados. Extracción y preparación de las muestras.*
- Instituto Nacional de Calidad. (2008). *NTP 400.011: Agregados. Definición y clasificación de agregados para uso en morteros y hormigones (concretos).*
- Instituto Nacional de Calidad. (2013). *NTP 400.018: Agregados. Método de ensayo normalizado para determinar materiales finos que pasan por el tamiz normalizado N° 200 por lavado en agregados.*
- Instituto Nacional de Calidad. (2013). *NTP 400.021: Agregados. Método de ensayo normalizado para la densidad, la densidad relativa (peso específico) y absorción del agregado grueso.*
- Instituto Nacional de Calidad. (2013). *NTP 400.022: Concreto. Práctica normalizada para la elaboración y curado de especímenes de concreto en laboratorio.*
- James, G., Witten, D., Hastie, T., Tibshirani, R., & Taylor, J. (2023). *An introduction to statistical learning with applications in Python*. 2da Edición. Editorial Springer
- Khayat, K. H. (1999). Workability, testing, and performance of self-consolidating concrete. *ACI Materials Journal*, 96(3), 346–353

- Kwan, A. K. H., & Ng, I. Y. T. (2010). Improving performance and robustness of self-compacting concrete by adding supplementary cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 24(12), 2260–2266.
- Melo, K. A., & Carneiro, A. M. P. (2009). Effect of metakaolin's fineness and content in self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*, 24(8), 1529–1535.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2018). *Norma técnica de edificación E.060: Concreto*. <https://www.gob.pe/institucion/vivienda/normas-legales/237018>
- Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2012). Introduction to linear regression analysis (5th ed.). Wiley.
- Neville, A. M. (2012). Properties of concrete (5th ed.). Pearson Education.
- Okamura, H., & Ouchi, M. (2003). Self-compacting concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(1), 5–15. <https://doi.org/10.3151/jact.1.5>
- Rabanal, D., & Su, A. (2017). *Diseño de un concreto autocompactable*. [Tesis de licenciatura, Universidad Señor de Sipán]. Repositorio Institucional USS. <https://repositorio.uss.edu.pe/handle/20.500.12802/2713>
- Safiuddin, M., West, J. S., & Soudki, K. A. (2011). Flowing ability of self-consolidating concrete and its binder paste and mortar components incorporating rice husk ash. *Canadian Journal of Civil Engineering*
- Sheen, Y. N., Huang, L. J., Sun, T. H., & Le, D. H. (2016). Engineering properties of self-compacting concrete containing stainless steel slags. *Procedia Engineering*, 142, 79–86.
- Silva, Y. F., Gordillo, M., & Delvasto, S. (2019). Valorización y optimización del residuo de mampostería para la elaboración de concreto autocompactante. *DYNA*, 86(208), 307–315. <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n208.73103>

Anexos

Anexo A Ficha técnica del cemento portland frontera tipo IP

FICHA TÉCNICA FRONTERA IP - 2022





CEMENTO PORTLAND TIPO IP

El Cemento Portland Puzolánico FRONTERA IP, ULTRA FUERTE, es un cemento elaborado con Clinker de alta calidad, yeso y adiciones. Su fabricación es realizada bajo un sistema de gestión de calidad certificado con ISO 9001 y de gestión ambiental ISO 14001, lo que garantiza un alto estándar de calidad. Cumple con la Norma Técnica Peruana NTP 334.090 y Norma Americana ASTM C595

Este cemento es Ecoamigable, debido a que en su producción se reduce ostensiblemente la emisión de CO₂, colaborando de esta manera con el medio ambiente, en la disminución de los gases con efecto invernadero. Los componentes especiales del cemento FRONTERA IP, ULTRAFUERTE, otorgan a los concretos y morteros propiedades especiales que lo hacen resistente a los ataques químicos (aguas saladas, sulfatadas, ácidas, desechos industriales, reacciones químicas en los agregados, etc.) y a las acciones del intemperismo. Puede ser utilizado en cualquier tipo de obras de infraestructura y construcción en general.

NTP 334.090

42.5Kg

1
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

REQUISITOS QUÍMICOS	CEMENTO FRONTERA TIPO IP	Requisitos Norma NTP 334.090 ASTM C-595
MgO [%]	1.5 a 3.0	6.00 Máx.
SO ₃ [%]	1.5 a 3.0	4.00 Máx.
Pérdida por ignición [%]	1.5 a 4.0	5.00 Máx.

REQUISITOS FÍSICOS	CEMENTO PORTLAND PUZOLÁNICO FRONTERA IP	Norma NTP 334.090 ASTM C-595
Peso específico [gr/cm ³]	2.75 a 2.85	-
Expansión en autoclave [%]	-0.07 a 0.03	-0.20 a 0.80
Fraguado Vicat inicial (minutos)	170 a 270	45 a 420
Contenido de aire	2.5 a 8.0	12 Máx.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	Kg/cm ²	MPa	Kg/cm ²	MPa
3 días	175 a 200	17.1 a 19.6	133 Min.	13 Min.
7 días	225 a 255	22 a 25	204 Min.	20 Min.
28 días	306 a 340	30 a 33.3	255 Min.	25 Min.

RESISTENCIA A LOS SULFATOS	%	%
% Expansión a los 6 meses	< 0.04	0.05 Máx.
% Expansión a 1 año	< 0.05	0.10 Máx.

2
RECOMENDACIONES DE USO

- ▶ Curado adecuado con abundante agua
- ▶ Mantener humectada la superficie para lograr la mayor resistencia y evitar fisuramiento por excesivo secado
- ▶ Tomar precauciones para el adecuado curado en vaceados cuando se presentan bajas temperaturas
- ▶ Asesorarse siempre con un profesional de la construcción/ingeniero civil

3 PROPIEDADES

- Alta resistencia a la compresión
- Resistencia al ataque de sulfatos y cloruros
- Mayor impermeabilidad
- Reduce la reacción nociva álcali - agregado.

4 BENEFICIOS AMBIENTALES

Menor consumo energético.
Cemento fabricado con menor emisión de CO₂.

5 RECOMENDACIONES DE SEGURIDAD

- El contacto con este producto provoca irritación cutánea e irritación ocular grave, evite el contacto directo en piel y mucosas.
- En caso de contacto con los ojos, lavar con abundante agua limpia.
- En caso de contacto con la piel, lavar con agua y jabón.
- Para su manipulación es obligatorio el uso de los siguientes elementos de protección:



Botas
Impermeables



Protección
Respiratoria



Guantes
Impermeables



Protección
Ocular

**6 ALMACENAMIENTO**

- Para mantener el cemento en óptimas condiciones se recomienda:
- Almacenar bajo techo, separado del suelo y de las paredes.
 - Protegerlos contra la humedad o corrientes de aire húmedo.
 - En caso de almacenamiento prolongado, cubrir el cemento con polietileno.

7 PRESENTACIONES DISPONIBLES**BOLSA 42.5 KG**

Ideal para proyectos medianos y pequeños, o con accesos complicados y pocas áreas de almacenamiento.

BIG BAG 1.0 TM

Para proyectos de constructoras que tienen planta de concreto. Facilita la manipulación de grandes volúmenes.

BIG BAG 1.5 TM

Para proyectos mineros y de gran construcción, requiere la utilización de equipos de carga.

8 NORMAS TÉCNICAS

EL CEMENTO PORTLAND PUZOLÁNICO FRONTERA IP - ULTRA FUERTE, cumple con las especificaciones técnicas de los siguientes países:

PAIS	NORMA		DENOMINACIÓN	
Perú	Norma Técnica Peruana	NTP 334.090	Cemento Portland Pozolánico	TIPO IP
Chile	Norma Chilena Oficial	NCh 148 Of68	Cemento Pozolánico	GRADO CORRIENTE

9 DURACIÓN

Almacenar y consumir de acuerdo a la fecha de producción utilizando el más antiguo. Se recomienda que el cemento sea utilizado antes de 90 días de la fecha de envasado indicada en la bolsa, luego de esa fecha, verifique la calidad del mismo.

Anexo B Ficha técnica del aditivo superplastificante ULMEN R-2027



R-2027

REDUCTOR DE AGUA DE ALTO RANGO PARA CONCRETOS ESPECIALES

Fecha de Emisión: May 31, 23
Revisión: 0
Fecha de Revisión: Set 07, 23
Página : 1 de 1

Industrias Ulmen S.A. Aditivos Nanotecnológicos

DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO

El R-2027 es un nanoaditivo en estado líquido de alta actividad por las nano materias de última generación que lo componen.

Pertenece a la línea Gaia Nanosilice, donde las reacciones químicas en la mezcla permiten que las nanopartículas de sílice se convierten en nanopartículas de cemento.

Según las normas ASTM C494 y NTP 334.088, cumple con la clasificación TIPO F – Aditivo Reductor de Agua de Alto Rango.

CARACTERÍSTICAS Y VENTAJAS

- Permite reducir el agua de diseño en 15% a 48%, según dosis de uso.
- Debido a su composición en base a solución de nanosilice, incrementa las resistencias mecánicas y durabilidad del concreto.
- Brinda una pérdida lenta de la consistencia sin retardar el proceso de fraguado, pues genera elevadas resistencias iniciales.
- Permite obtener una mezcla con elevada consistencia sin alterar o disminuyendo la relación A/C.
- Está libre de cloruros, por ello no promoverá la corrosión.
- Modifica la reología de la mezcla, brindando una alta fluidez y adecuada trabajabilidad para construcciones modulares.
- Modifica la viscosidad, incrementando la resistencia a la segregación en concreto altamente fluidos.

CAMPOS DE APLICACIÓN

El R-2027 es ideal para concretos con baja relación agua – cementante. Se puede aplicar en concretos de altas exigencias, ya que brinda una mantención prologada, altas resistencias iniciales y mejora la durabilidad ante agentes químicos nocivos. Por las propiedades reológicas que brinda al concreto se puede aplicar en concretos autonivelantes y rheoplásticos en general. Debido a su robustez nos permite trabajar con cualquier tipo de cemento.

DOSIFICACIÓN

El R-2027 puede ser utilizado en dosis desde 0.3% a 2% con respecto al peso del cemento. Se recomienda realizar pruebas previas para validar la dosis óptima. El producto debe de ser diluido en el agua efectiva y adicionado a la mezcla durante el proceso de mezclado.

Estas recomendaciones pueden sufrir variaciones debido a materiales de mala calidad, condiciones de obra y/o incorrecta metodología de uso, por ello se recomienda contactar a nuestros asesores técnicos ULMEN.

PROPIEDADES FÍSICAS

Apariencia	Líquida
Color	Café
Densidad	1,11 ± 0,02 g/mL

PRESENTACIÓN

Se suministra en:

- IBC de 1200 Kg
- Cilindro de 220 Kg
- Garrafas de 60 Kg
- Baldes de 20 Kg

DURACIÓN Y ALMACENAMIENTO

6 meses almacenado en un lugar fresco y protegido del sol, recomendado por nuestro Sistema de Control de Calidad, certificado bajo ISO9001.

INSTRUCCIONES DE SEGURIDAD

Para información y consejo sobre seguridad en la manipulación y disposición de productos químicos, los usuarios deben referirse a la Hoja de Datos de Seguridad vigente, la cual contiene datos físicos, ecológicos toxicológicos y otros datos relativos a la seguridad.

Cooperativa las Vertientes, Calle 4, Mz C-1 Sub Lt 2-F Villa El Salvador – Lima

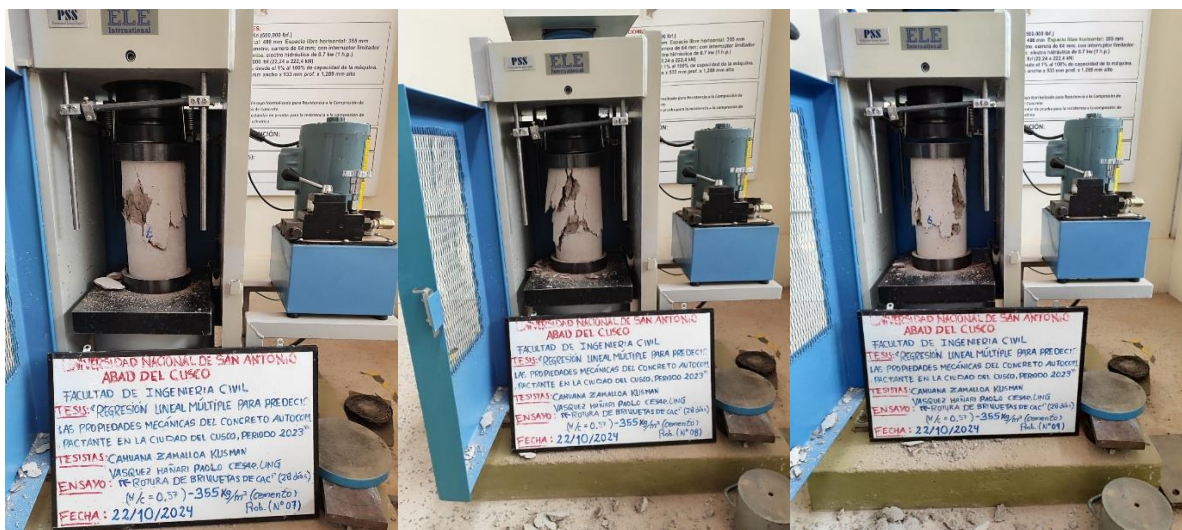
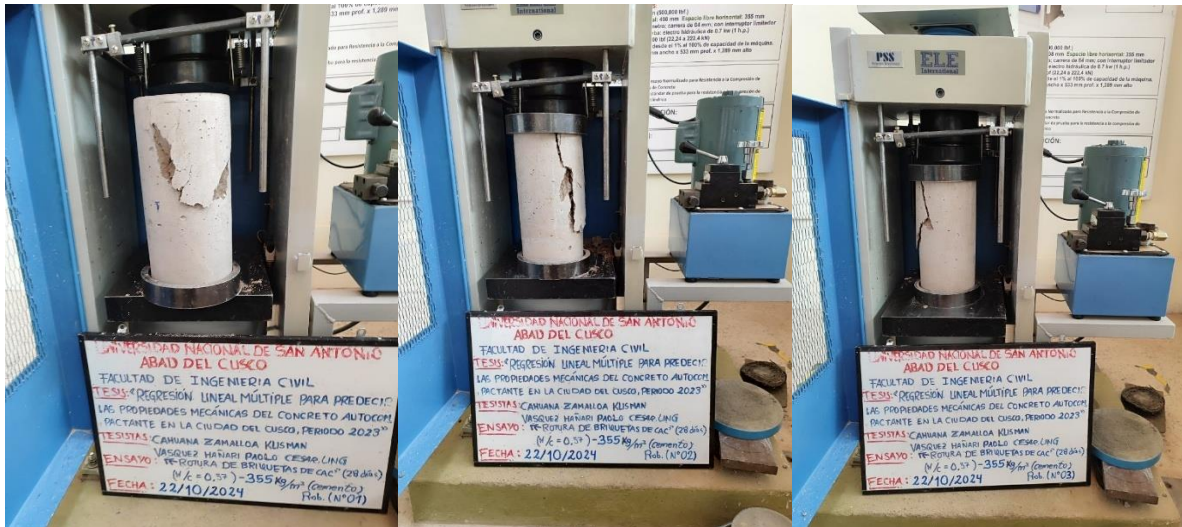
Teléfonos (01) 719-4126 / 719-4127

www.cognoscibletechnologies.com

www.ulmen.cl

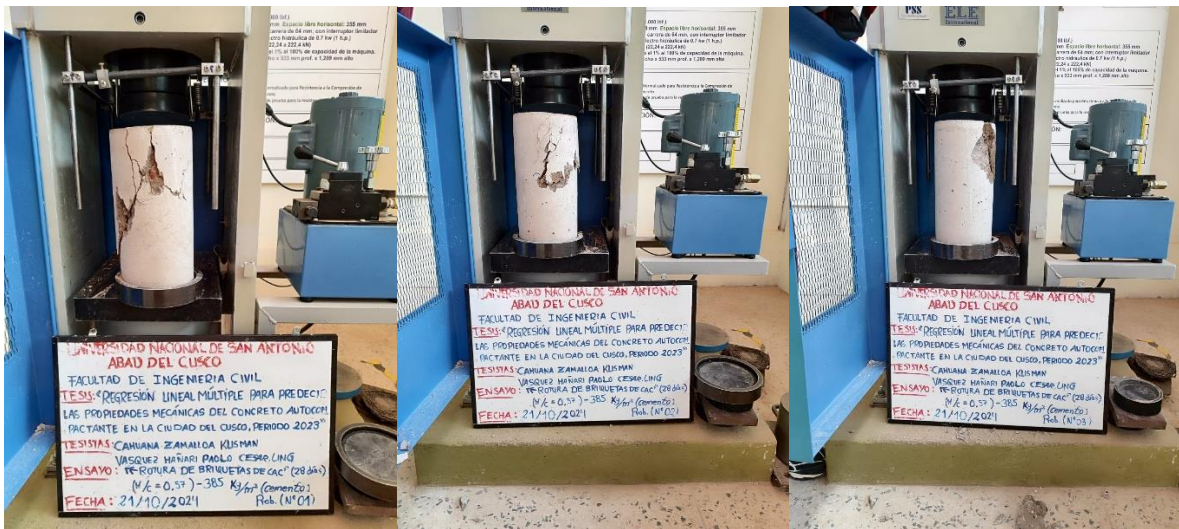
atencionalcliente@ulmen.cl

Anexo C Rotura de briquetas del CAC-355





Anexo D Rotura de briquetas del CAC-385





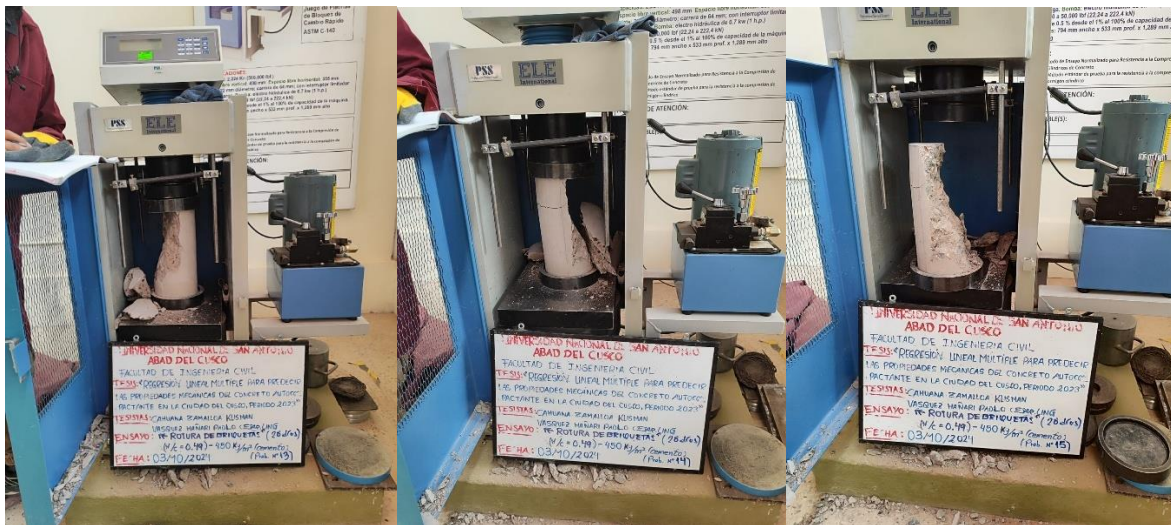
Anexo E Rotura de briquetas del CAC-420



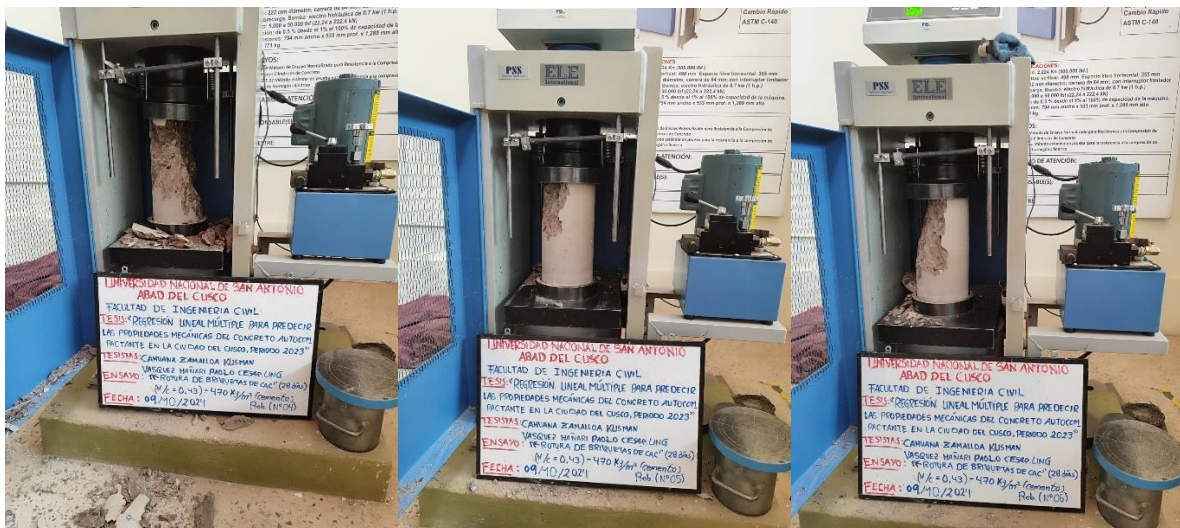


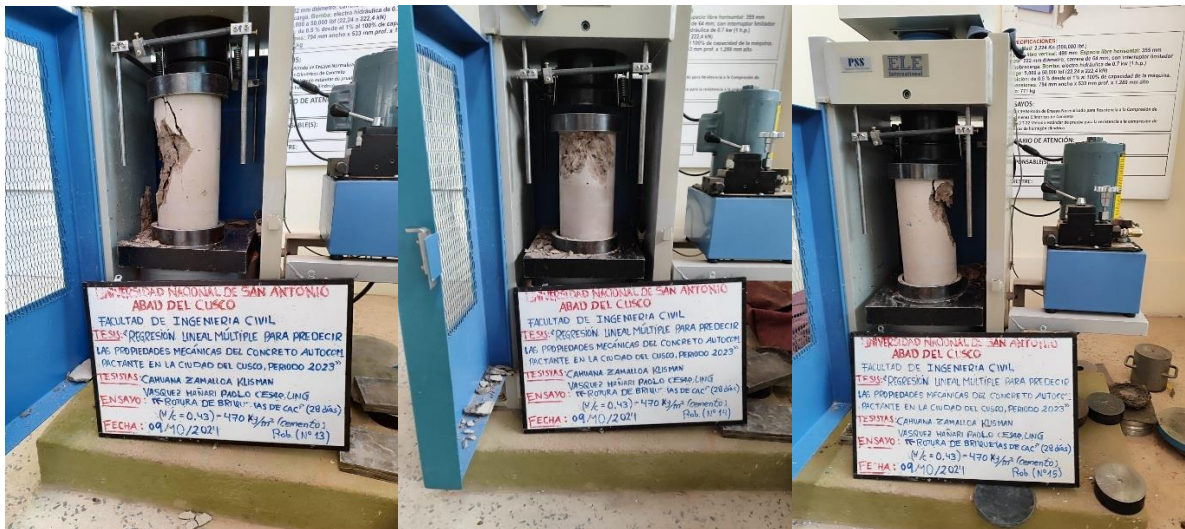
Anexo F Rotura de briquetas del CAC-450



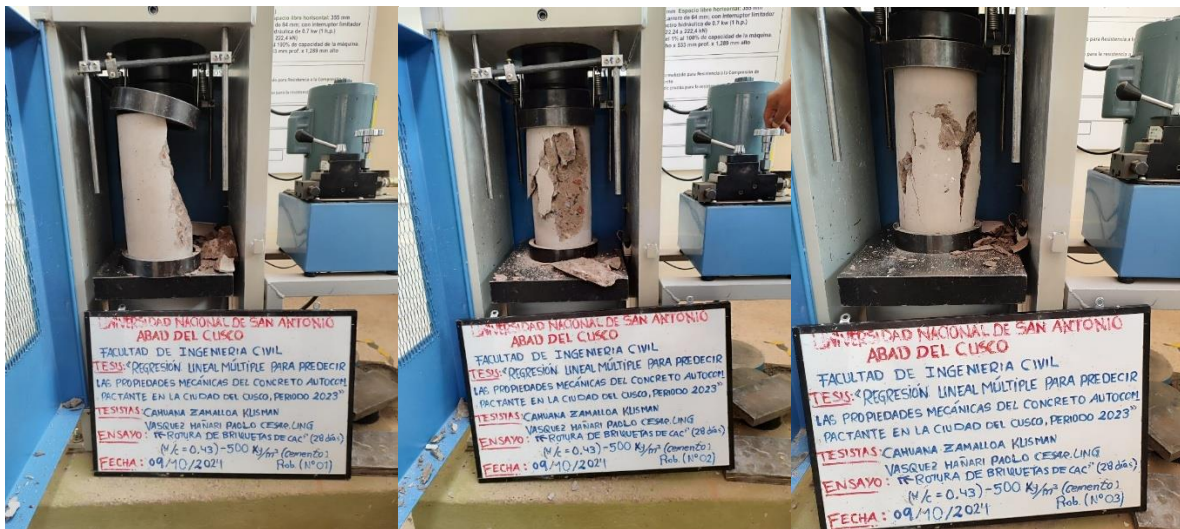


Anexo G Rotura de briquetas del CAC-470





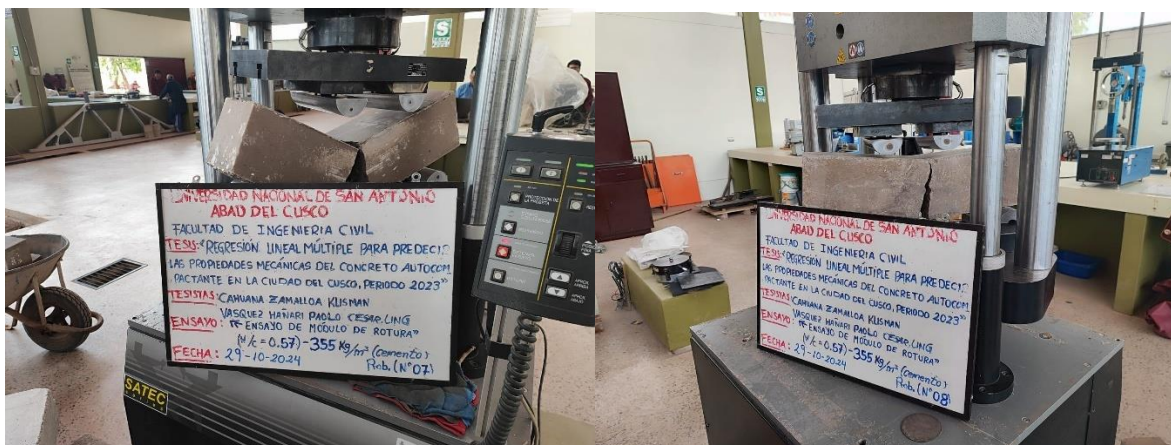
Anexo H Rotura de briquetas del CAC-500





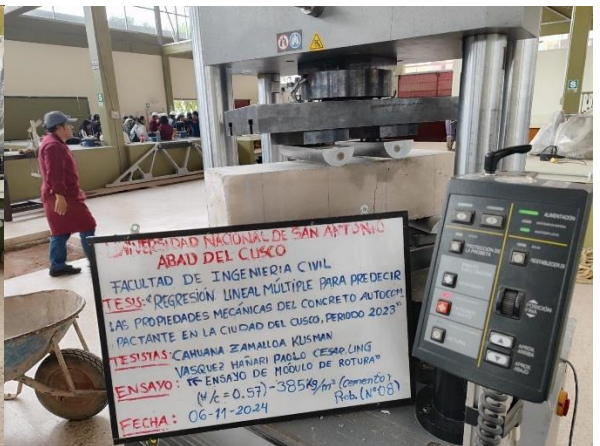
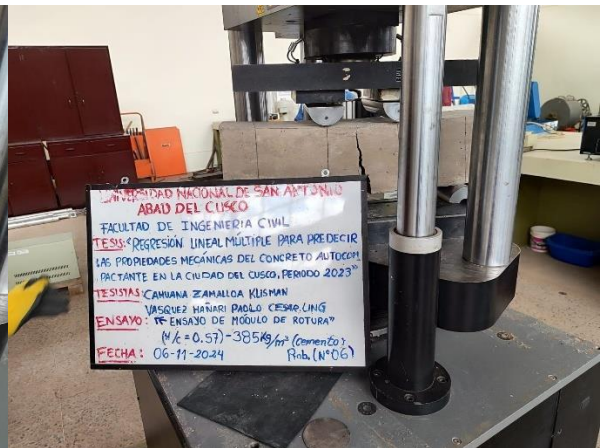
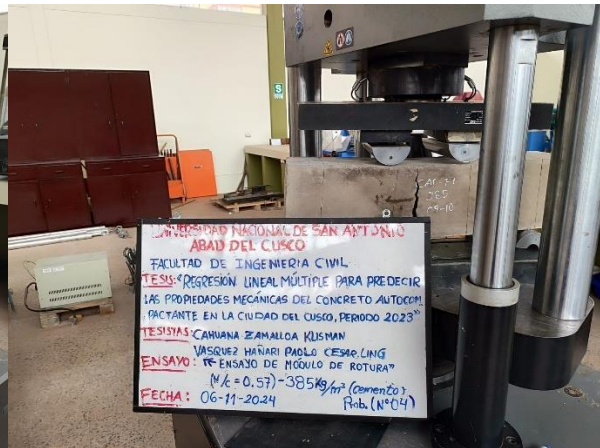
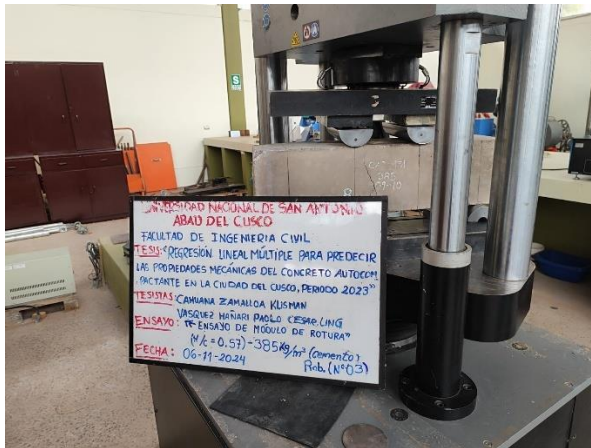
Anexo I Rotura de viguetas del CAC-355





Anexo J Rotura de viguetas del CAC-385







MATRIZ DE CONSISTENCIA

“Regresión Lineal Múltiple para Predecir las Propiedades Mecánicas del Concreto Autocompactante en la ciudad del Cusco, periodo 2023”

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPOTESIS GENERAL
¿Cuál será el modelo de regresión lineal múltiple para predecir las propiedades mecánicas del concreto autocompactante a partir de la dosificación de sus componentes?	Desarrollar un modelo de regresión lineal múltiple que permita predecir las propiedades mecánicas del concreto autocompactante en función de las proporciones de sus componentes.	Las proporciones de los componentes del concreto autocompactante influyen significativamente en sus propiedades mecánicas, y esta relación puede ser modelada de forma precisa mediante la regresión lineal múltiple.
PROBLEMAS ESPECIFICOS	OBJETIVOS ESPECIFICOS	HIPOTESIS ESPECIFICAS
¿Cuál será el modelo de regresión lineal múltiple para predecir la resistencia a la compresión del concreto autocompactante a partir de la dosificación de sus componentes?	Desarrollar un modelo de regresión lineal múltiple que permita predecir la resistencia a la compresión del concreto autocompactante en función de las proporciones de sus componentes.	Las proporciones de los componentes del concreto autocompactante influyen significativamente en su resistencia a la compresión, y esta relación puede ser modelada de forma precisa mediante la regresión lineal múltiple
¿Cuál será el modelo de regresión lineal múltiple para predecir la resistencia a la flexión del concreto autocompactante a partir de la dosificación de sus componentes?	Desarrollar un modelo de regresión lineal múltiple que permita predecir la resistencia a la flexión del concreto autocompactante en función de las proporciones de sus componentes.	Las proporciones de los componentes del concreto autocompactante influyen significativamente en su resistencia a la flexión, y esta relación puede ser modelada de forma precisa mediante la regresión lineal múltiple.
¿Qué variables de la mezcla tiene mayor peso predictivo en la resistencia del concreto autocompactante, según el modelo de regresión lineal múltiple?	Establecer que componentes de la mezcla tiene mayor influencia en la resistencia, según el modelo de regresión lineal múltiple.	Las variables con mayor peso predictivo en la resistencia a la compresión son el contenido de cemento y el agregado grueso.
¿Cuál será la precisión del modelo de regresión propuesto para estimar la resistencia del concreto autocompactante con base en los materiales utilizados?	Validar la precisión del modelo de regresión lineal múltiple para predecir la resistencia del concreto autocompactante	El modelo de regresión lineal múltiple presenta un alto grado de precisión estadística ($R^2 > 0.8$) para estimar la resistencia del concreto autocompactante, con significancia ($p < 0.05$).

MATRIZ DE OPERACIONALIZACION DE LAS VARIABLES

Variable	Dimensión	Indicadores	Instrumento/ Técnica	Metodología
Concreto Autocompactante (Independiente)	Diseño de mezcla (composición)	Cemento (kg/m3) Agua (lts/m3) Agregado grueso (kg/m3) Agregado fino (kg/m3) Aditivo (% del cemento)	Registro de mezcla y bitácora técnica / Normas ACI 237R-07 EFNARC	Nivel de Investigación Correlacional
	Propiedades en estado fresco	Ensayos de fluidez en cono de Abrams invertido Ensayo de caja en "L" Ensayo V-Funnel		Tipo de investigación Aplicada
Propiedades Mecánicas (Dependiente)	Propiedades en estado endurecido	Resistencia a la compresión a los 28 días (kg/cm2 o Mpa)	Pruebas ASTM (C39 y C78)	Enfoque de la investigación Cuantitativa
		Resistencia a la flexión a los 28 días (kg/cm2 o Mpa)		Diseño de la Investigación Experimental