



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

EVALUACIÓN MEDIANTE CORRELACIÓN DE LA RESISTENCIA TARDÍA A 28 DÍAS DE UN CEMENTO TIPO UG EN FUNCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA, MEDIANTE EL USO DEL GRANULÓMETRO LÁSER

Juan Pablo Tabín del Pinal

Asesorado por el Ing. Luis Alberto Sologaistoa Romero

Co-asesorado por el Lic. Edgar Saúl Loaiza Salguero

Guatemala, marzo de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN MEDIANTE CORRELACIÓN DE LA RESISTENCIA TARDÍA A 28 DÍAS DE UN
CEMENTO TIPO UG EN FUNCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA, MEDIANTE EL USO DEL
GRANULÓMETRO LÁSER**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JUAN PABLO TABÍN DEL PINAL

ASESORADO POR EL ING. LUIS ALBERTO SOLOGAISTOGA ROMERO
CO-ASESORADO POR EL LIC. EDGAR SAÚL LOAIZA SALGUERO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, MARZO DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. César Ariel Villela Rodas
EXAMINADOR	Ing. Jorge Rodolfo García Carrera
EXAMINADORA	Inga. Adela María Marroquín González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

EVALUACIÓN MEDIANTE CORRELACIÓN DE LA RESISTENCIA TARDÍA A 28 DÍAS DE UN CEMENTO TIPO UG EN FUNCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA, MEDIANTE EL USO DEL GRANULÓMETRO LÁSER

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 18 de julio de 2019.

Juan Pablo Tabín del Pinal

Guatemala 06 de julio de 2020

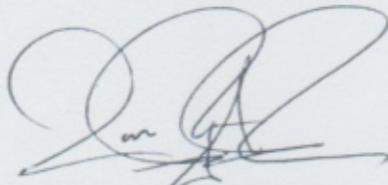
Ingeniero Químico
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela Ingeniería Química
Presente.

Estimado Ingeniero Álvarez:

Le saludo cordialmente, deseándole éxitos en sus actividades. Por medio de la presente hago constar que he revisado y aprobado el Informe Final del trabajo de graduación titulado: "EVALUACIÓN MEDIANTE CORRELACIÓN DE LA RESISTENCIA TARDÍA A 28 DÍAS DE UN CEMENTO TIPO UG EN FUNCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA, MEDIANTE EL USO DEL GRANULÓMETRO LÁSER.", elaborado por el estudiante de la carrera de Ingeniería Química, Juan Pablo Tabín del Pinal, quien se identifica con el registro académico 2014-04143 y con el CUI 2954 70577 0301.

Agradeciendo la atención a la presente, me suscribo de usted,

Atentamente,



Luis Alberto Sologastoa Romero
ASESOR
Ingeniero Químico
Colegiado activo no. 1,435

Luis Alberto Sologastoa Romero
Ingeniero Químico
Colegiado No. 1,435

Guatemala 06 de julio de 2020

Ingeniero Químico
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela Ingeniería Química
Presente.

Estimado Ingeniero Álvarez:

Le saludo cordialmente, deseándole éxitos en sus actividades. Por medio de la presente hago constar que he revisado y aprobado el Informe Final del trabajo de graduación titulado: "EVALUACIÓN MEDIANTE CORRELACIÓN DE LA RESISTENCIA TARDÍA A 28 DÍAS DE UN CEMENTO TIPO UG EN FUNCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA, MEDIANTE EL USO DEL GRANULÓMETRO LÁSER.", elaborado por el estudiante de la carrera de Ingeniería Química, Juan Pablo Tabín del Pinal, quien se identifica con el registro académico 2014-04143 y con el CUI 2954 70577 0301.

Agradeciendo la atención a la presente, me suscribo de usted,

Atentamente,



Edgar Saúl Loaiza Salguero
CO-ASESOR
Licenciado en Química
Colegiado activo no. 1,579

Edg. Saúl Loaiza Salguero
QUIMICO
Colegiado No. 1579



Guatemala, 18 de julio de 2019.
Ref. EIQ.TG-DI.025.2019.

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el registro de evaluación, correlativo **011-2019**, le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

Solicitado por el estudiante universitario: **Juan Pablo Tabín del Pinal**.
Identificado con número de carné: **2954705770301**.
Identificado con registro académico: **201404143**.
Previo a optar al título de la carrera: **Ingeniería Química**.
En la modalidad: **Diseño de Investigación, Seminario de Investigación**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

EVALUACIÓN MEDIANTE CORRELACIÓN DE LA RESISTENCIA TARDÍA A 28 DÍAS DE UN CEMENTO TIPO UG EN FUNCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA, MEDIANTE EL USO DEL GRANULÓMETRO LÁSER

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por:

Luis Alberto Sologastoa Romero, profesional de la Ingeniería Química
Edgar Saúl Loaiza Salguero, profesional de la Química

Habiendo encontrado el referido trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.



C.c.: archivo

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

César Alfonso García Guerra
Profesional de la Ingeniería Química
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación





Guatemala, 22 de marzo de 2021.
Ref. EIQ.048.2021

Aprobación del informe final del trabajo de graduación

Ingeniera
Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Revisado el INFORME FINAL DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN (TESIS), DENOMINADO **EVALUACIÓN MEDIANTE CORRELACIÓN DE LA RESISTENCIA TARDÍA A 28 DÍAS DE UN CEMENTO TIPO UG EN FUNCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA, MEDIANTE EL USO DEL GRANULÓMETRO LÁSER** del(la) estudiante Juan Pablo Tabín del Pinal, se conceptúa que el documento presentado, reúne todas las condiciones de calidad en materia administrativa y académica (rigor, pertinencia, secuencia y coherencia metodológica), por lo tanto, se procede a la autorización del mismo, para que el(la) estudiante pueda optar al título de Ingeniería Química.

“Id y Enseñad a Todos”


Ing. Williams G. Alvarez Merlo, M.I.G., M.U.I.E.
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Cc. Archivo
WGAM/mpeca

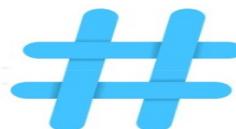


ACAAI

Agencia Centroamericana de Acreditación de
Programas de Arquitectura y de Ingeniería



Formando Ingenieros Químicos en Guatemala desde 1939



**NO SALGAS
QUÉDATE EN
CASA**

DTG. 127.2021.

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **EVALUACIÓN MEDIANTE CORRELACIÓN DE LA RESISTENCIA TARDÍA A 28 DÍAS DE UN CEMENTO TIPO UG EN FUNCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA, MEDIANTE EL USO DEL GRANULÓMETRO LÁSER**, presentado por el estudiante universitario: **Juan Pablo Tabín del Pinal**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana

Guatemala, marzo de 2021.

AACE/asga

ACTO QUE DEDICO A:

Mi madre	Claudia Tabín, por siempre haberme sacado adelante y estar en todo momento en mi vida.
Mis abuelos	Marta Julia del Pinal y Guillermo Tabín, por ser como padres y apoyarme toda la vida.
Mi hermano	Andrés Tabín, por sacar lo mejor de mí para ser ejemplo suyo.
Mi tío	Julio Tabín, por ser como un hermano y siempre apoyarme.
Mi tío	Guillermo Tabín, por ser un ángel que siempre está conmigo.
Mi bisabuela	Rosa, por ser un ángel que tuve la dicha de gozar en vida y enseñarme la bondad.
Mi novia	Annie Kraus, por siempre ser una guía y ayudarme a perseverar hasta alcanzar la meta.
Doña Odilia	Por estar siempre al pendiente y ser parte de la familia.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por brindarme la oportunidad de poder estudiar y desarrollarme como profesional.
Facultad de Ingeniería	Por brindarme los conocimientos para poder desempeñarme como profesional de la ingeniería.
Cementos Progreso S.A.	Por darme la oportunidad de realizar la tesis y brindarme todo lo necesario para el desarrollo de esta.
Ing. Luis Sologaistoa	Por haberme brindado sus consejos para el desarrollo de la tesis, estar siempre dispuesto a responder mis preguntas y compartir su conocimiento.
Lic. Saúl Loaiza	Por haberme brindado el apoyo y el acceso de los equipos para el desarrollo experimental de la tesis, por siempre estar dispuesto a aclarar mis dudas, compartir su conocimiento y literatura.

**Personal de laboratorio
físico de planta San
Gabriel**

Por haberme ayudado en la elaboración de cubos para la prueba de resistencia a la compresión a 28 días, también por los consejos y conocimientos compartidos.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
HIPÓTESIS.....	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Clínker	5
2.2. Cemento	5
2.2.1. Cemento tipo UG	5
2.3. Aditivo.....	6
2.4. Molienda	6
2.5. Equipo de molienda.....	6
2.6. Tamaño de partícula.....	7
2.7. Difracción láser	7
2.7.1. Teoría de Mie.....	8
2.8. Granulómetro láser	10
2.9. Distribuciones de volumen ponderado	10
2.10. Percentiles.....	11
2.11. Método de Blaine.....	12
2.12. Fineza 325.....	13

3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	15
3.1.	Variables	15
3.2.	Delimitación de campo de estudio	15
3.2.1.	Área de conocimiento.....	15
3.2.2.	Proceso	16
3.2.3.	Etapas del proceso	16
3.2.4.	Ubicación.....	17
3.2.5.	Clima	17
3.2.6.	Viabilidad.....	17
3.3.	Recursos humanos disponibles	17
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	18
3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa.....	18
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	19
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	19
3.8.	Análisis estadístico.....	26
3.8.1.	Diseño experimental.....	26
3.8.2.	Análisis de varianza (ANOVA) y regresión lineal múltiple.....	26
3.8.3.	Análisis de correlación entre variables	28
3.8.4.	Análisis de varianza (ANOVA) y regresión lineal para cada variable.....	30
3.8.4.1.	Dv 10	30
3.8.4.2.	Dv 50	31
3.8.4.3.	Dv 90	36
3.8.4.4.	Diferencia de medias para resultados obtenidos de la fineza 325 por medio del granulómetro láser y de la malla de 45 μm	41

3.8.4.5.	Diferencia de medias para resultados obtenidos de la superficie específica Blaine por medio del granulómetro láser y del permeabilímetro.....	42
4.	RESULTADOS	43
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	47
	CONCLUSIONES	53
	RECOMENDACIONES	55
	BIBLIOGRAFÍA	57
	APÉNDICES	59

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Dispersión.	9
2.	Partes granulómetro láser.	10
3.	% volumen vs tamaño de partícula.	12
4.	Permeabilímetro Blaine y sus partes.	13
5.	Equipo Alpine para medir tamaño de partícula por medio de una malla y una aspiradora.	14
6.	Gráfica de la resistencia a 28 días, experimentales y predichas, en función del tamaño de partícula.	33
7.	Gráfica de residuales.	36
8.	Gráfica de la resistencia a 28 días, experimentales y predichas, en función del tamaño de partícula.	37
9.	Gráfica de residuales.	40
10.	Gráfica de la ecuación de regresión de la resistencia a 28 días en función de la variable de tamaño de partícula $D_v 90$	43

TABLAS

I.	Variables.	15
II.	Tipos de variable.	18
III.	Tamaños de partícula a distintos percentiles y resistencia tardía a 28 días.	20
IV.	Promedio de los datos del porcentaje de pasante de la malla de 45 μm medidos en el granulómetro láser y en la malla 45 μm	22

V.	Promedio de los datos del área específica Blaine medidos en el granulómetro láser y el permeabilímetro.....	24
VI.	Regresión lineal múltiple para la resistencia a 28 días en función de las 3 variables de tamaño de partícula.	27
VII.	Análisis de varianza para la regresión lineal múltiple de la resistencia a 28 días en función de las 3 variables de tamaño de partícula	27
VIII.	Coeficientes de la ecuación de la regresión lineal múltiple para la resistencia a 28 días en función de las 3 variables de tamaño de partícula.	28
IX.	Correlación entre las variables de tamaño de partícula Dv 50 y Dv 90.....	29
X.	Correlación entre las variables de tamaño de partícula Dv 10 y Dv 50.....	29
XI.	Correlación entre las variables de tamaño de partícula Dv 10 y Dv 90.....	29
XII.	Regresión lineal para la resistencia a 28 días en función de la variable Dv 10.....	30
XIII.	Coeficientes de la ecuación de la regresión lineal para la resistencia a 28 días en función de la variable Dv 10.....	31
XIV.	Análisis de varianza para la regresión lineal de la resistencia a 28 días en función de la variable Dv 10.....	31
XV.	Regresión lineal para la resistencia a 28 días en función de la variable Dv 50.....	32
XVI.	Coeficientes de la ecuación de la regresión lineal para la resistencia a 28 días en función de la variable Dv 50.....	32
XVII.	Ecuación lineal obtenida por medio de la regresión lineal de la resistencia a 28 días en función de la variable Dv 50.....	32

XVIII.	Análisis de varianza para la regresión lineal de la resistencia a 28 días en función de la variable Dv 50.	33
XIX.	Resistencias a 28 días predichas y residuales para la regresión con la variable Dv 50.	34
XX.	Regresión lineal para la resistencia a 28 días en función de la variable Dv 90.	36
XXI.	Coefficientes de la ecuación de la regresión lineal para la resistencia a 28 días en función de la variable Dv 90.	37
XXII.	Ecuación lineal obtenida por medio de la regresión lineal de la resistencia a 28 días en función de la variable Dv 90.	37
XXIII.	Análisis de varianza para la regresión lineal de la resistencia a 28 días en función de la variable Dv 90.	38
XXIV.	Resistencia a 28 días predichas y residuales para la regresión lineal con la variable Dv 90.	38
XXV.	Valor Z determinado para los promedios de las finezas 325 de todas las muestras.	41
XXVI.	Valor Z determinado para los promedios de las áreas específicas Blaine de todas las muestras.	42
XXVII.	Ecuación de regresión lineal y coeficiente de correlación para la resistencia a 28 días en función del tamaño de partícula Dv 90.	44
XXVIII.	Datos de resistencia a 28 días estimados con la ecuación de regresión lineal en comparación con datos experimentales de muestras aleatorias nuevas.	44
XXIX.	Comparación entre medias de los valores de la fineza 325 obtenidos por medio del granulómetro láser y la malla 45 μm	45
XXX.	Comparación entre medias de los valores del área específica Blaine obtenidos por medio del granulómetro láser y el permeabilímetro.	45

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
UG	Cemento de uso general
Dv10	Diámetro de partícula, expresado en micrómetros (μm), más grande del 10 % de la muestra.
Dv50	Diámetro de partícula, expresado en micrómetros (μm), más grande del 50 % de la muestra.
Dv90	Diámetro de partícula, expresado en micrómetros (μm), más grande del 90 % de la muestra.
m	Metro
μm	Micrómetro
nm	Nanómetro
R28	Resistencia tardía del cemento tipo UG a 28 días, expresada en MPa o PSI.

GLOSARIO

ANOVA	Por sus siglas en inglés “ <i>analysis of variance</i> ”, en español se conoce como ANDEVA que representa el análisis de varianza.
ASTM	Sociedad Americana para Prueba y Materiales, por sus siglas en inglés. Es una organización de normas internacionales.
Blaine	Fineza de los materiales en polvo; se expresa como una superficie específica en centímetros cuadrados por gramo o metros cuadrados por kilogramo y se determina por medio del permeabilímetro Blaine.
Cal libre	Óxido de calcio que no reaccionó en la formación de clínker, siendo perjudicial cuando reacciona con el agua formando hidróxido de calcio.
Cemento	Material de construcción compuesto por medio de clínker y adiciones, que se endurece y es resistente al reaccionar químicamente con el agua por la formación de hidratos.
Cemento Tipo UG	Cemento para uso general que es producto de la adición de clínker, yeso y adiciones.

Clínker	Producto obtenido por el resultado de la calcinación en horno de mezclas de calizas arcillosas con adición de otros materiales.
Correlación	Relación recíproca entre dos o más variables.
Fineza 325	Porcentaje de muestra que pasa a través del tamiz #325.
Granulómetro Láser	Equipo para la determinación de la distribución del tamaño de partícula.
Regresión	Proceso estadístico que es utilizado para estimar las relaciones entre variables.

RESUMEN

Esta investigación es parte de la optimización de predictores para obtener resultados de la resistencia tardía del cemento tipo UG a 28 días, por medio del análisis realizado con el granulómetro láser en planta San Gabriel de Cementos Progreso.

Se corrieron 49 muestras en el granulómetro láser por triplicado y se obtuvo un promedio de los resultados para poder obtener el modelo por medio de una regresión lineal con los datos de resistencia tardía a 28 días. Se encontró dicho modelo lineal de la resistencia tardía del cemento tipo UG a 28 días en función del tamaño de partícula, dado por el percentil D90 de la muestra total.

Inicialmente se planteó obtener un modelo en función de tres variables, los tamaños de partícula de los percentiles D10, D50 y D90, por medio de análisis estadísticos se determinó que dos variables tienen correlación alta como para que ambas puedan ser tomadas en cuenta. Por medio del análisis de varianza se determinó que estadísticamente, únicamente se podía utilizar una variable para describir el fenómeno.

También se obtuvo datos de la fineza de cada muestra por medio del granulómetro láser en el diámetro $45\ \mu\text{m}$ y de la superficie específica, Blaine, para compararlos con los datos obtenidos con los equipos de finura y el permeabilímetro, respectivamente.

Finalmente, el modelo obtenido fue $R_{28} = -155,16 * D_{v90} + 11\ 665,95$. Aceptando la hipótesis alterna la cual establece que existe una relación entre la resistencia tardía a 28 días de un cemento tipo UG y el tamaño de partícula de este. También se aceptan ambas hipótesis alternas para la comparación entre la fineza y Blaine del granulómetro laser y de los equipos respectivos, en donde se acepta que hay diferencia entre las medias de los datos medidos por el granulómetro y los equipos. Se trabajó con un nivel de significancia del 5 %.

OBJETIVOS

General

Evaluar la correlación de la resistencia tardía a 28 días de un cemento tipo UG en función del tamaño de partícula de este, utilizando un granulómetro láser para la medición de la distribución porcentual de las partículas.

Específicos

1. Desarrollar un modelo matemático que prediga el comportamiento de la resistencia tardía del cemento a 28 días en función del tamaño de partícula de este.
2. Comparar resultados reales en relación de los calculados mediante el modelo matemático obtenido.
3. Analizar la viabilidad de los requisitos para poder sustituir los métodos alternos de fineza en el tamiz #325 y Blaine.

HIPÓTESIS

Existe una relación inversamente proporcional entre la resistencia tardía a 28 días en el cemento tipo UG y la distribución porcentual de las partículas de este, ensayadas mediante el granulómetro láser en planta San Gabriel.

Hipótesis nula:

Ho1: No existe diferencia significativa entre los valores medios de las distribuciones porcentuales de las partículas al cambiar de muestra, con un nivel de significancia del 5 %.

Ho2: No existe diferencia significativa entre los valores medios de los datos de porcentaje de pasante de la malla 45 μm y del granulómetro láser MYTOS, con un nivel de significancia del 5 %.

Ho3: No existe diferencia significativa entre los valores medios de los datos del área específica Blaine del permeabilímetro y del granulómetro láser MYTOS, con un nivel de significancia del 5 %.

Hipótesis alternativa:

Hi1: Existe diferencia significativa entre los valores medios de las distribuciones porcentuales de las partículas al cambiar de muestra, con un nivel de significancia del 5 %.

Hi2: Existe diferencia significativa entre los valores medios de los datos de porcentaje de pasante de la malla 45 μm y del granulómetro láser MYTOS, con un nivel de significancia del 5 %.

Hi3: Existe diferencia significativa entre los valores medios de los datos del área específica Blaine del permeabilímetro y del granulómetro láser MYTOS, con un nivel de significancia del 5 %.

INTRODUCCIÓN

Este estudio surgió de la problemática de contar con pocos predictores de fácil medición para la determinación de la resistencia tardía a 28 días del cemento tipo UG producido en la planta San Gabriel de Cementos Progreso.

El cemento tipo UG se compone de Clinker y aditivos tales como yeso, puzolana y caliza. El Clinker es el componente principal del cemento y el responsable de las propiedades hidráulicas del cemento. El Clinker se conforma por 4 fases minerales: silicato tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), silicato bicálcico ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), aluminato tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) y ferrito aluminato tetracálcico ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$). Las abreviaturas de las fases en la industria cementera para dichas fases son C3S, C2S, C3A y C4AF, respectivamente.

El C3S es el mineral más activo hidráulicamente, por lo que es el mayor responsable de las resistencias finales del cemento, y se intenta maximizar el porcentaje de este mineral presente en el Clinker con un buen manejo del proceso. El C2S es menos activo hidráulicamente que el C3S, y se busca limitarlo. Las últimas dos fases actúan como fundentes en las reacciones para la obtención de Clinker y su aporte en las resistencias finales no es significativo, por lo que no se toman en cuenta como factores que intervengan directamente en ellas.

El yeso se agrega generalmente para regular el fraguado y así poder retardar la hidratación del cemento que en otro caso fuera extremadamente rápido. La puzolana es rica en sílice y se agrega para poder controlar la formación de productos de hidratación a través de una reacción secundaria, que

en otros casos serían perjudiciales para el cemento, como la cal libre, por ejemplo. Por último, la caliza es una piedra rica en hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), la cual se agrega como un *filler*.

Debido a que la resistencia del cemento depende de diversos factores, se hace hincapié en que este estudio únicamente toma en cuenta el tamaño de partícula y no se enfoca en las otras variables que influyen en un porcentaje significativo en dicha resistencia, como por ejemplo la química de las materias primas, el porcentaje de las fases minerales del Clinker, especialmente la del C3S y C2S. Tampoco se toman en cuenta la fineza ni el área específica, aunque de cierto modo están relacionadas con el tamaño de partícula.

Al contar con un granulómetro láser de gama alta es posible no sólo obtener toda una curva granulométrica, sino también el área específica conocida como Blaine. De la curva granulométrica interesa poder conocer el porcentaje de pasante en la malla #325 o tamaño $45\ \mu\text{m}$ para un cemento tipo UG. Es por ello que también surgió el interés de realizar el estudio con dicho granulómetro y poder evaluar el cambio de los métodos de análisis, para la determinación de la fineza y área específica, de tal manera que se pudiera optimizar el proceso de medición y así ahorrar tiempo para la entrega de resultados.

1. ANTECEDENTES

En el proceso de cemento se manejan diversos parámetros que se deben controlar de manera eficiente. Para ello, a veces es necesario recurrir a técnicas manuales en el laboratorio que, en comparación con las técnicas automatizadas, toman mucho tiempo para determinar un resultado y la repetitividad se ve afectada por una cantidad innumerable de factores, entre los más frecuentes resalta el error ocasionado por la persona que hace el experimento. Mientras que, para una máquina automatizada el error se reduce a varias milésimas y la repetitividad es increíblemente confiable.

En 1990 se realizó en Madrid, España un estudio denominado Granulometría láser: estudio comparativo con las técnicas de tamizado y elutriación aplicado a materiales puzolánicos. Los autores discutieron que al comparar las técnicas de tamizado y granulometría láser los resultados obtenidos por tamizado son próximos a los encontrados por difracción láser, y los valores que proporcionan los tamices son superiores o inferiores a los obtenidos por láser dependiendo de la zona geográfica, esto es, de la propia muestra estudiada. Por lo tanto, teniendo en cuenta el año en que fue realizado el estudio se puede analizar la viabilidad de los requisitos para poder sustituir el método de fineza en tamiz #325.

En 1992, Sean Deron James realizó una extensiva investigación para poder determinar cuál era la relación entre la resistencia tardía del mortero de cemento y su composición química y la fineza de este. En el capítulo 8, James expresa: Entre más fino el cemento, más grande será el área superficial total de las partículas. La velocidad de hidratación del cemento se incrementa al

incrementar su área superficial, causando un incremento en la tasa de ganancia de la resistencia a la compresión. Esto ocurre porque un área superficial mayor se encuentra disponible para la hidratación. En dicha investigación, el equipo utilizado fue un espectrómetro de difracción láser.

En el 2007, el estudiante Brian Alexander Luján Montes hace un estudio similar para poder determinar si el diámetro de partícula afecta a las resistencias tardías de un cemento tipo I, utilizando un analizador láser. En dicho estudio, se determinó que efectivamente, el diámetro de partícula tiene una influencia significativa en las resistencias tardías del cemento. De hecho, al tener un diámetro de partícula menor se obtuvieron mayores resistencias a la compresión. Esto asevera que la molienda influye significativamente en las propiedades física del cemento para que las reacciones se lleven a cabo de una manera más eficiente. Sin embargo, la correlación obtenida fue la del diámetro en función de la resistencia. Lo que quiere decir que, para poder conocer el diámetro de la partícula se necesita conocer la resistencia tardía. Cabe mencionar que en aquel entonces no se contaba con la tecnología de punta con la que se cuenta ahora y la elaboración de dicho estudio fue en planta San Miguel.

En el 2017 se realizó un estudio denominado Análisis de la distribución del tamaño del cemento por el método de granulometría láser y su relación con las resistencias a través de los ensayos universales, por la estudiante Cinthia Estefanía Muñoz Gárate de la Universidad de Cuenca, Ecuador. Se utilizó la técnica de granulometría láser para medir la distribución del tamaño de partículas del cemento. El granulómetro láser utilizado en su estudio fue un Mastersizer 3000 de Malvern PANalytical. La experimentación se basó en poder correlacionar la distribución del tamaño de partícula del cemento con la resistencia mecánica del mismo a 1, 3, 7 y 28 días mediante la función

granulométrica de Rossin Rammler, según la norma NTE INEN 488:2009 de Ecuador. Ella concluyó que el análisis de distribución del tamaño de partículas analizadas mediante la función granulométrica de Rossin Rammler no está correlacionado con las propiedades mecánicas del cemento.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Clíinker

Principal componente en la elaboración del cemento. Este es producido en un horno donde se hace pasar “harina cruda”, que es una mezcla de caliza y toba. A este tipo de horno se le llama horno de clinkerización. La harina cruda se lleva a temperaturas que alcanzan los 1 250-1 400 grados Celsius. El objetivo de esto es poder descarbonatar la harina cruda y poder obtener óxido de calcio, el cual al fundirse con otros óxidos presentes en la materia prima llega a producir clíinker.

2.2. Cemento

Existen diferentes tipos de cementos que se producen en la industria cementera. No es lo mismo construir una pared en la ciudad, que construir las bases de un muelle dentro del mar. Para cada situación existe un tipo de cemento que mejor se adapte a las condiciones en las cuales va a estar expuesta la edificación y así se pueda maximizar el tiempo de vida de esta.

2.2.1. Cemento tipo UG

Cemento hidráulico para uso general de la construcción, conocido por sus siglas UG. Es un cemento hecho a base de clíinker, yeso y adiciones con otros componentes mineralógicos producido por molienda en conjunta o por separado cuya proporción varía según el fabricante. Este tipo de cemento da mejores

tiempos de fraguados que permiten un manejo adecuado sin que se presente pérdida de movilidad prematura.

2.3. Aditivo

Los aditivos en la industria del cemento son aquellos que se agregan al clínker ya producido para la elaboración de cemento. Entre ellos están la puzolana o toba, caliza y el yeso. Estos tienen propiedades que, al mezclarse con el clínker, puedan contribuir con la calidad y las propiedades del tipo de cemento que se esté produciendo.

2.4. Molienda

La molienda es la operación en la cual se lleva a cabo la reducción de tamaño de una determinada muestra. En la industria cementera se necesita tener un tamaño de partícula específico para la elaboración del cemento. Dependiendo del tipo de cemento, así tiene un requerimiento especial para poder cumplir con las normas que rigen la calidad.

2.5. Equipo de molienda

Normalmente la molienda se lleva a cabo de un molino vertical o de bolas. El molino vertical cuenta con rodos y una mesa giratoria, al cual entran gases calientes procedentes del horno de clinkerización para el secado de los sólidos. Los rodos bajan hasta casi tocar la mesa y empiezan a moler. Los sólidos pulverizados son acarreados por medio de los gases calientes hasta llegar a un separador el cual separa los gases y sólidos. Los sólidos que no cumplen con el tamaño establecido rebotan y caen debajo de la mesa para poder ser ingresados de nuevo al molino. En un molino de bolas por medio de

la fricción que generan y el impacto de las bolas se logra la reducción de tamaño. Este molino está girando a una velocidad angular establecida y existen diferentes tamaños de bolas dentro del molino.

2.6. Tamaño de partícula

La propiedad física más importante de las muestras es el tamaño de partícula. “La medición de distribuciones de tamaño de partícula se lleva a cabo en una amplia gama de industrias y con frecuencia constituye un parámetro crítico en la fabricación de muchos productos.”¹

2.7. Difracción láser

Es una técnica de medición de tamaño de partícula ampliamente utilizada para materiales que van desde cientos de nanómetros hasta varios milímetros en tamaño.

La difracción láser mide las distribuciones de tamaño de partícula mediante la variación angular de la intensidad de la luz dispersada cuando un rayo láser pasa a través de una muestra de partículas dispersas. Luego se analizan los datos de la intensidad de dispersión angular para calcular el tamaño de las partículas responsables de crear el patrón de dispersión, utilizando la teoría Mie de la dispersión de la luz.

¹ MALVERN INSTRUMENTS. *A basic guide to particle characterization*. p. 2.

2.7.1. Teoría de Mie

La difracción láser mide las distribuciones de tamaño de partícula a partir de la variación angular de la intensidad de la luz dispersada cuando un rayo láser pasa a través de una muestra de partículas dispersas. Las partículas grandes dispersan la luz en ángulos pequeños en relación con el rayo láser, y las partículas pequeñas dispersan la luz en ángulos grandes. Luego se analizan los datos de la intensidad de dispersión angular para calcular el tamaño de las partículas responsables de crear el patrón de dispersión, utilizando la teoría de Mie de la dispersión de la luz. El tamaño de partícula se registra como un diámetro de esfera equivalente al volumen.

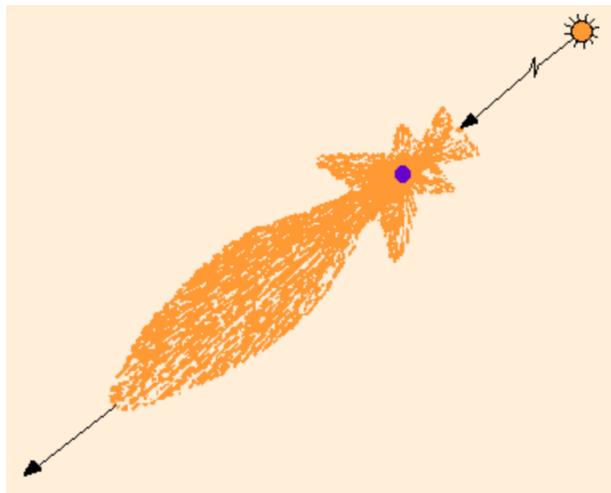
Para aquellas partículas que tienen un diámetro cercano a la longitud de onda de la luz utilizada, se utiliza la teoría de Mie para evaluar las mediciones, suponiendo un modelo de esfera equivalente al volumen.

Esta teoría permite evaluar también las distribuciones de intensidad características de las partículas muy pequeñas y no se limita a ángulos inferiores a 90° como es el caso de la teoría de Fraunhofer. Lo que requiere esta teoría para poder evaluar el tamaño de partículas es que se conozca el índice de refracción y el índice de absorción de la muestra de material. Las compañías que diseñan los difractómetros láser cuentan con base de datos integradas que incluyen dichas propiedades.²

² MALVERN INSTRUMENTS. *A basic guide to particle characterization*. p. 14.

La teoría de Mie se basa en las ecuaciones de Maxwell, a partir de las cuales se puede obtener la ecuación de onda vectorial en coordenadas esféricas. Según la dispersión de Mie, se produce más dispersión hacia delante que en ninguna otra dirección. Conforme aumenta el tamaño de partícula, la dispersión hacia delante también aumenta. La siguiente figura muestra el aspecto típico de la dispersión producida por partículas más grandes que la longitud de onda de la luz incidente.³

Figura 1. **Dispersión**



Fuente: ANÓNIMO. *Dispersión de Mie*.

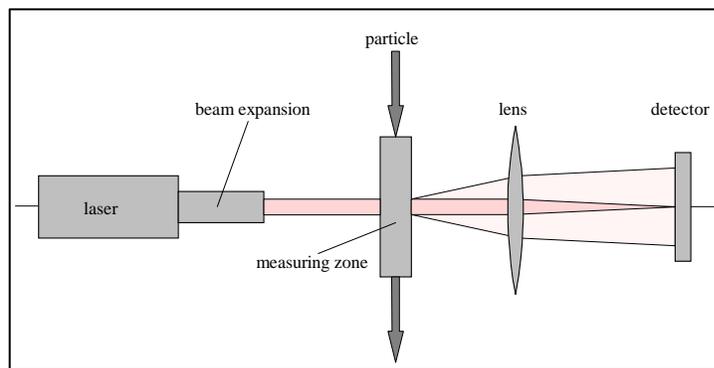
<http://rammb.cira.colostate.edu/wmovl/VRL/Tutorials/euromet/courses/spanish/satmet/s2400/s2400005.html>. Consulta: 3 de junio de 2019.

³ ANÓNIMO. *Dispersión de Mie*. <http://rammb.cira.colostate.edu/wmovl/VRL/Tutorials/euromet/courses/spanish/satmet/s2400/s2400005.html>.

2.8. Granulómetro láser

Equipo que opera por medio de un rayo láser que pasa a través de la muestra en una cámara y mide la luz esparcida sobre un rango de ángulos. La información del tamaño de partícula es obtenida por medio del ángulo desviado por la interacción del rayo con la muestra.

Figura 2. Partes granulómetro láser.



Fuente: SYMPATEC. *MYTOS operating instructions*. p. 38.

Como se muestra en la figura 1, el haz de luz es emitido por el láser y pasa a través de una cámara de medición en la cual la muestra pasa al mismo tiempo, y el haz de luz sufre una desviación la cual pasa a través de un lente para impactar en un detector y poder medir el ángulo formado para determinar el tamaño de partícula.

2.9. Distribuciones de volumen ponderado

Las técnicas de difracción de luz estática como la difracción láser darán una distribución de volumen ponderado. En este caso la contribución de cada partícula en la distribución se relaciona con el volumen de esa partícula

(equivalente a la masa si la densidad es uniforme). Esto es extremadamente útil desde una perspectiva comercial debido a que la distribución representa la composición de la muestra en términos de volumen/masa, y por lo tanto su valor potencial.

2.10. Percentiles

Para distribuciones de tamaño de partícula de volumen ponderado, como los que se miden en el granulómetro láser, a menudo es conveniente reportar los parámetros con base al máximo tamaño de partícula dado para un porcentaje de volumen de la muestra.

Los percentiles son definidos como X_{aB} donde:

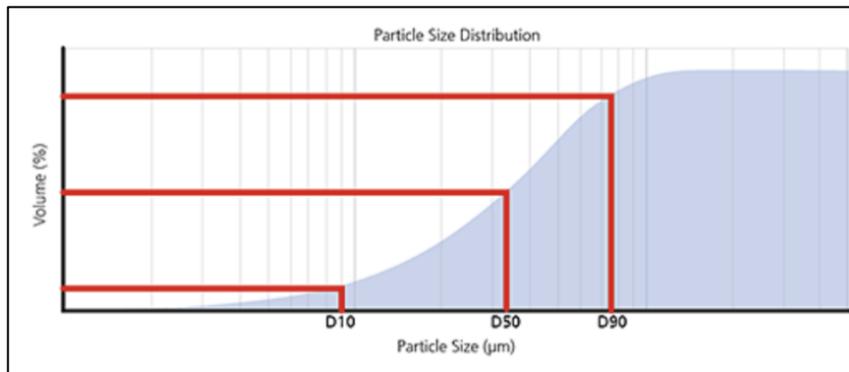
X = parámetro, usualmente D para diámetro.

a = distribución de la ponderación, como por ejemplo “ v ” de volumen.

B = porcentaje de la muestra debajo de este tamaño de partícula.

Por ejemplo, el Dv_{50} sería el máximo diámetro de partícula que existe debajo del 50 % del volumen de la muestra. Los percentiles más comúnmente reportados son los Dv_{10} , Dv_{50} y Dv_{90} , como se ilustra en la figura siguiente:

Figura 3. % volumen vs tamaño de partícula



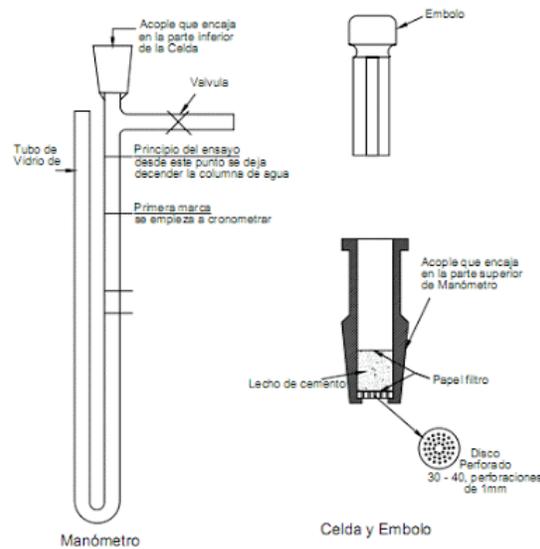
Fuente: MALVERN INSTRUMENTS. *A basic guide to particle characterization*. p. 7.

Con base a estos percentiles se obtendrá el modelo que mejor se ajuste para determinar la resistencia a 28 días del cemento tipo UG producido en planta San Gabriel de Cementos Progreso.

2.11. Método de Blaine

Es un método para determinar la fineza de un cemento u otro material fino con base a la permeabilidad al aire de una muestra preparada bajo condiciones especificadas en la norma ASTM – C204. La muestra se prepara y se introduce en un émbolo el cual tiene filtros de papel en ambos extremos de la muestra. Después se coloca el embolo en el permeabilímetro y se bombea el líquido patrón dentro de este hasta llegar al aforo superior. Por último, se deja de bombear y se espera a que el líquido patrón llegue al aforo inferior. Se toma el tiempo y por medio de una ecuación se encuentra la Blaine de la muestra en cm^2g^{-1} .

Figura 4. **Permeabilímetro Blaine y sus partes**



Fuente: ANÓNIMO. *Superficie específica del cemento.*

<https://apuntesingenierocivil.blogspot.com/2010/10/superficie-especifica-del-cemento.html>.

Consulta: 2 de febrero de 2020.

2.12. **Fineza 325**

Se refiere al porcentaje de pasante de una muestra en la malla # 325 o de 45 μm . Se cuantifica el material retenido y por medio de pesos se determina cuanto fue el porcentaje que pasó la malla. En el cemento tipo UG se necesita que el porcentaje de pasante esté preferiblemente en 95 %. El método que se utiliza es por medio de una aspiradora que succiona el aire a una determinada presión para que el material que esté sobre la malla se mueva y así aspire el material de menor tamaño a las 45 μm .

Figura 5. **Equipo Alpine para medir tamaño de partícula por medio de una malla y una aspiradora**



Fuente: elaboración propia.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Las variables por utilizar serán cuantitativas para obtener datos numéricos que permitan cuantificar el fenómeno a estudiar.

Tabla I. **Variables**

No.	Variable	Unidad	Factor potencial de diseño		Tipo de variable	
			Constante	No Constante	Independiente	Dependiente
1	Tamaño de partícula	μm		X	X	
2	Presión	psi		X		X

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación de campo de estudio

El estudio se basó respecto a diversos factores y conocimientos que se detallan en seguida.

3.2.1. Área de conocimiento

Fundamento del conocimiento: Operaciones Unitarias, fisicoquímica.

3.2.2. Proceso

- Se tomaron muestras de cemento tipo UG producido en la planta San Gabriel de Cementos Progreso.
- Se midió la distribución del tamaño de partícula de cada muestra.
- Se elaboraron cubos de cemento según norma ASTM C-109.
- Se dejaron fraguar durante 28 días.
- Se obtuvieron datos de resistencia a dichas edades.
- Se correlacionaron los datos de tamaño de partícula obtenidos con la resistencia a 28 días de cada muestra.
- Se obtuvo un modelo que relacionó las variables que estadísticamente cumplieran.
- Se compararon los resultados obtenidos con el modelo y los obtenidos experimentalmente con la máquina de compresión de cubos de las diferentes muestras de cemento tipo UG para verificar los resultados.

3.2.3. Etapa del proceso

- Elaboración de las muestras
- Fase de experimentación
- Ordenamiento de datos y análisis estadístico
- Análisis de datos
- Presentación de resultados y conclusiones

3.2.4. Ubicación

El proceso de toma de datos y procesamiento de estos se realizaron en las instalaciones de la planta San Gabriel de Cementos Progresos, ubicado en San Juan, Sacatepéquez.

3.2.5. Clima

San Juan, Sacatepéquez tiene un clima templado, con temperaturas que oscilan entre los 12 y 27 °C. Las condiciones del laboratorio son controladas a una temperatura de 23 ± 2 °C.

3.2.6. Viabilidad

La realización de la investigación fue viable, debido a que la empresa proporcionó todos los recursos necesarios para llevarla a cabo.

3.3. Recursos humanos disponibles

La recolección de datos, los cálculos y la interpretación de estos estuvo a cargo del estudiante Juan Pablo Tabín del Pinal, quien estuvo bajo la tutela de su asesor Ing. Qco. Luis Alberto Sologaitoa Romero y co-asesor Lic. En Química Edgar Saúl Loiza Salguero.

La elaboración de los cubos para las pruebas de resistencia estuvo a cargo de las analistas del laboratorio físico de planta San Gabriel, por sus años de experiencia en la elaboración de los cubos.

3.4. Recursos materiales disponibles

Según la metodología experimental propuesta, se requerirá de los siguientes equipos de medición:

- Granulómetro láser, modelo MYTOS de Sympatec
- Máquina de compresión de cubos, SERVO PLUS, marca MATEST
- Moldes de bronce y acero inoxidable de 50 mm², marca Humboldt
- Gabinete de curado a 23 °C y humedad relativa > 50 % para el fraguado a 28 días.

3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa

Como se observa en la tabla 2, las variables involucradas en el proceso son de carácter cuantitativo, por lo que el estudio también lo es.

Tabla II. Tipos de variable

Variable	Tipo
Presión	Cuantitativo
Tamaño de partícula	Cuantitativo

Fuente: elaboración propia.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

- Se obtuvieron muestras de cemento tipo UG a analizar
- Se midió el tamaño de partícula por medio del granulómetro láser del laboratorio de control de calidad de la planta San Gabriel de Cementos Progreso.
- Se elaboraron los cubos de cemento con el tamaño de partícula establecido, con el apoyo del laboratorio físico de control de calidad de la planta San Gabriel de Cementos Progreso.
- Se tomaron los datos de resistencia a 28 días.
- Por último, se desarrolló el modelo que relacionara las variables que cumplieran estadísticamente de tamaño de partícula y resistencia tardía a 28 días.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Para esta investigación se recolectaron los datos obtenidos de los tamaños de partícula de las diferentes muestras de cemento, así como también los datos del porcentaje de pasante de la malla 45 μm , tanto en el granulómetro láser MYTOS como en la malla 45 μm , y los datos de Blaine, tanto en el granulómetro láser MYTOS como en el permeabilímetro. Dichos datos fueron tabulados en las siguientes tablas, las cuales se pueden encontrar en su totalidad en la sección de apéndices.

Tabla III. **Tamaños de partícula a distintos percentiles y resistencia tardía a 28 días**

Tamaño de partícula (μm) y resistencia a 28 días (psi)				
Muestra	Promedio			R28
	Dv10	Dv50	Dv90	
1	1,710	13,65	44,87	4 090
2	1,680	13,78	45,27	4 180
3	1,780	14,12	44,65	4 190
4	1,810	13,16	43,61	4 210
5	1,733	14,05	46,38	4 230
6	2,290	14,84	46,21	4 330
7	1,740	14,37	46,67	4 360
8	1,680	14,01	46,62	4 370
9	1,830	14,68	46,34	4 380
10	1,740	13,94	44,88	44 20
11	1,790	14,99	47,36	4 430
12	1,753	13,81	46,41	4 430
13	1,740	14,59	46,85	4 430
14	1,730	13,81	44,05	4 450
15	1,653	13,06	44,46	4 460
16	1,707	13,67	46,33	4 500
17	1,720	14,06	45,69	4 510
18	1,680	13,87	45,48	4 520
19	2,010	15,14	47,69	4 530
20	1,740	14,37	46,77	4 590
21	1,673	13,13	43,14	4 640
22	1,770	14,52	46,14	4 640

Continuación de la tabla III.

23	1,680	13,34	42,40	4 660
24	1,710	13,51	44,57	4 680
25	1,737	13,66	44,42	4 700
26	1,677	13,07	45,02	4 810
27	1,697	13,66	46,13	4 820
28	1,700	13,22	43,18	4 850
29	1,730	14,50	46,52	4 920
30	1,693	12,84	43,45	4 950
31	1,707	13,16	44,75	5 000
32	1,733	13,11	42,97	5 050
33	1,693	12,94	42,69	5 090
34	1,573	11,31	39,73	5 090
35	1,853	13,37	43,65	5 130
36	1,733	13,17	43,02	5 140
37	1,660	12,52	42,19	5 150
38	1,690	12,91	43,31	5 160
39	1,613	12,42	42,63	5 180
40	1,733	13,11	43,47	5180
41	1,663	12,66	43,98	5 210
42	1,807	13,41	41,12	5 260
43	1,670	12,36	41,28	5 270
44	1,700	13,07	44,32	5 280
45	1,733	13,14	43,72	5 340
46	1,673	12,50	42,37	5370
47	1,970	12,92	41,21	5 400
48	1,627	12,04	42,36	5 720
49	1,627	11,56	37,96	5 970

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. Promedio de los datos del porcentaje de pasante de la malla de 45 μm medidos en el granulómetro láser y en la malla 45 μm

Fineza (% pasante 45 μm)		
Muestra	Granulómetro láser MYTOS	Malla 45 μm
	Promedio	Promedio
1	90,08	94,42
2	89,84	94,70
3	90,21	95,69
4	90,75	94,67
5	89,16	93,52
6	89,23	94,16
7	88,95	93,68
8	89,01	95,66
9	89,15	93,84
10	90,07	95,06
11	88,46	94,00
12	89,19	90,80
13	88,82	94,21
14	90,56	93,79
15	90,30	94,50
16	89,24	92,68
17	89,58	94,80
18	89,71	95,14
19	88,23	93,57
20	88,89	92,60
21	91,03	96,17
22	89,29	93,65
23	91,39	95,66

Continuación de la tabla IV.

24	90,24	94,86
25	90,34	95,12
26	89,99	88,02
27	89,33	93,49
28	91,01	95,69
29	89,04	94,51
30	90,85	94,88
31	90,14	94,72
32	91,07	93,70
33	91,26	95,61
34	92,83	95,45
35	90,76	94,37
36	91,09	95,16
37	91,48	95,97
38	90,93	95,30
39	91,26	94,88
40	90,84	95,12
41	90,56	94,67
42	92,26	95,96
43	92,07	95,91
44	90,38	94,77
45	90,70	95,66
46	91,38	95,60
47	92,54	95,45
48	91,35	94,95
49	94,03	98,18

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Promedio de los datos del área específica Blaine medidos en el granulómetro láser y el permeabilímetro**

Blaine (cm²/g)		
Muestra	Granulómetro láser MYTOS	Permeabilímetro
	Promedio	Promedio
1	4 080	4 420
2	4 110	4 420
3	3 940	4 060
4	3 970	4 140
5	4 020	4 120
6	3 420	4 120
7	3 970	4 130
8	4 090	4 370
9	3 840	4 190
10	4 010	4 370
11	3 870	4 300
12	3 990	4 410
13	3 960	4 310
14	4 040	4 110
15	4 210	4 500
16	4 080	4 510
17	4 030	3 980
18	4 110	4 380
19	3 630	3 350
20	3 980	3 880
21	4 180	4 380
22	3 920	4 260
23	4 150	4 580
24	4 080	4 190

Continuación de la tabla V.

25	4 030	4 380
26	4 170	4 250
27	4 090	4 150
28	4 130	4 480
29	3 990	4 270
30	4 160	4 480
31	4 110	4 260
32	4 080	4 130
33	4 150	4 220
34	4 510	4 640
35	3 910	4 130
36	4 070	4 190
37	4 240	4 230
38	4 160	4 350
39	4 320	4 470
40	4 090	4 310
41	4 220	4 300
42	3 950	4 090
43	4 200	3 980
44	4 130	4 080
45	4 080	4 200
46	4 240	4 180
47	3 820	4 300
48	4 330	4 300
49	4 390	4 300

Fuente: elaboración propia.

3.8. Análisis estadístico

Para el análisis estadístico se llevó a cabo un análisis de varianza en cada regresión que se realizó. También se hizo una prueba de correlación para demostrar que dos de las variables involucradas en la regresión lineal múltiple que se realizó, correlacionaban de tal forma que se pudo eliminar una de ellas en las pruebas siguientes para determinar la variable que mejor describiera el comportamiento de la resistencia a 28 días. Por otra parte, para determinar si existía diferencia significativa en las medias de los promedios de los datos medidos con el granulómetro láser y los equipos de medición de fineza y Blaine, se realizó una diferencia de medias.

3.8.1. Diseño experimental

El diseño experimental se realizó al seleccionar muestras al azar de cemento tipo UG. A cada muestra se le realizaron las pruebas de fineza 325 y Blaine 3 veces, tanto en el granulómetro laser como en la malla de 45 μm y permeabilímetro, respectivamente.

3.8.2. Análisis de varianza (ANOVA) y regresión lineal múltiple

Se decidió optar por el análisis de varianza y regresión lineal múltiple para encontrar una relación que describiera mejor el comportamiento de la resistencia en función del tamaño de partícula.

Tabla VI. **Regresión lineal múltiple para la resistencia a 28 días en función de las 3 variables de tamaño de partícula**

Estadística de regresión	
R Múltiple	0,77
R Cuadrado	0,59

R Cuadrado ajustado	0,56
Error estándar	287,61
Observaciones	49

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Análisis de varianza para la regresión lineal múltiple de la resistencia a 28 días en función de las 3 variables de tamaño de partícula**

	df	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	3	5 305 147,64	1 768 382,55	21,38	9,33E-09
Residual	45	3 722 417,16	82 720,38		
Total	48	9 027 564,79			

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Coeficientes de la ecuación de la regresión lineal múltiple para la resistencia a 28 días en función de las 3 variables de tamaño de partícula**

	Coeficientes	Error estándar	P-valor
<i>Intercept</i>	10 423,27	1 139,66	7,89E-12
Dv10	572,17	496,03	2,55E-01
Dv50	-294,47	132,65	3,15E-02
Dv90	-60,00	47,17	2,10E-01

Fuente: elaboración propia.

Dado que estadísticamente la regresión lineal múltiple no fue satisfactoria se procedió a buscar una solución para obtener el modelo que mejor se adaptara al fenómeno estudiado. Por medio del análisis de correlación entre variables se determinó que todas las variables son estadísticamente significativas entre sí. Por lo tanto, la regresión lineal múltiple quedó descartada.

3.8.3. Análisis de correlación entre variables

El análisis de correlación fue útil para descartar variables que fueran similares estadísticamente y con menor impacto en la ecuación que describiera el fenómeno en estudio. A continuación, se presentan los resultados.

Tabla IX. **Correlación entre las variables de tamaño de partícula
Dv 50 y Dv 90**

	Dv50	Dv90
Dv50	1	
Dv90	88 %	1

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Correlación entre las variables de tamaño de partícula
Dv 10 y Dv 50**

	Dv10	Dv50
Dv10	1	
Dv50	56 %	1

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Correlación entre las variables de tamaño de partícula
Dv 10 y Dv 90**

	Dv10	Dv90
Dv10	1	
Dv90	33 %	1

Fuente: elaboración propia.

3.8.4. Análisis de varianza (ANOVA) y regresión lineal para cada variable

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los resultados del análisis estadístico para cada variable.

3.8.4.1. Dv 10

A continuación, se presentan los resultados para la variable Dv10.

Tabla XII. **Regresión lineal para la resistencia a 28 días en función de la variable Dv 10**

Estadística de regresión	
R Múltiple	0,27
R Cuadrado	0,07
R Cuadrado Ajustado	0,05
Error estándar	422,55
Observaciones	49

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Coeficientes de la ecuación de la regresión lineal para la resistencia a 28 días en función de la variable Dv 10**

	Coeficientes	Error estándar	P-valor
Intercepto	6 585,21	947,83	9,81E-09
Dv10	-1 028,47	545,01	6,53E-02

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Análisis de varianza para la regresión lineal de la resistencia a 28 días en función de la variable Dv 10**

	df	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	635 816,24	635 816,24	3,56	0,07
Residual	47	8 391 748,55	178 547,84		
Total	48	9 027 564,79			

Fuente: elaboración propia.

3.8.4.2. Dv 50

A continuación, se presentan los resultados para la variable Dv50.

Tabla XV. **Regresión lineal para la resistencia a 28 días en función de la variable Dv 50**

Estadística de regresión	
R Múltiple	0,74
R Cuadrado	0,54
R Cuadrado ajustado	0,53
Error estándar	297,04
Observaciones	49

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Coefficientes de la ecuación de la regresión lineal para la resistencia a 28 días en función de la variable Dv 50**

	Coefficientes	Error estándar	P-valor
<i>Intercept</i>	9 932,24	691,32	8,14E-19
Dv50	-381,53	51,30	1,78E-09

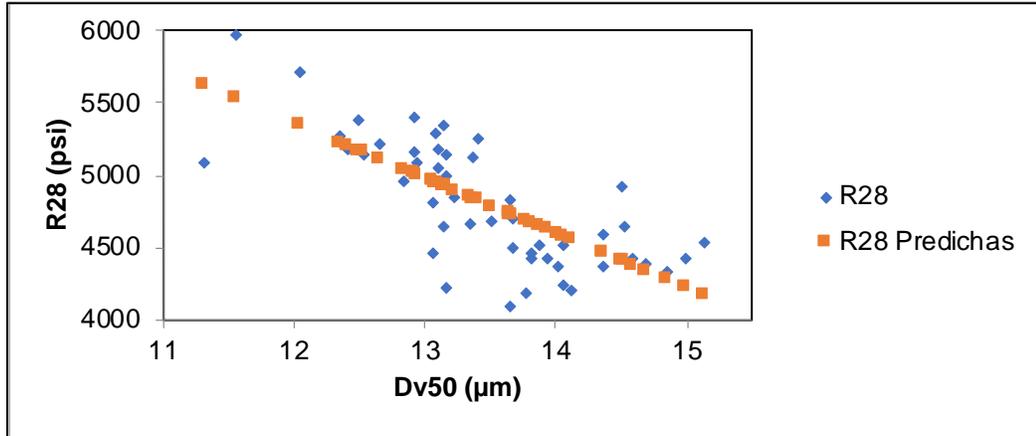
Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Ecuación lineal obtenida por medio de la regresión lineal de la resistencia a 28 días en función de la variable Dv 50**

$$R_{28} = -381,53 Dv\ 50 + 9\ 932,24$$

Fuente: elaboración propia.

Figura 6. **Gráfica de la resistencia a 28 días, experimentales y predichas, en función del tamaño de partícula**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Análisis de varianza para la regresión lineal de la resistencia a 28 días en función de la variable Dv 50**

	df	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	4 880 701,23	4 880 701,23	55,32	1,78E-09
Residual	47	4 146 863,56	88 231,14		
Total	48	9 027 564,79			

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Resistencias a 28 días predichas y residuales para la regresión con la variable Dv 50**

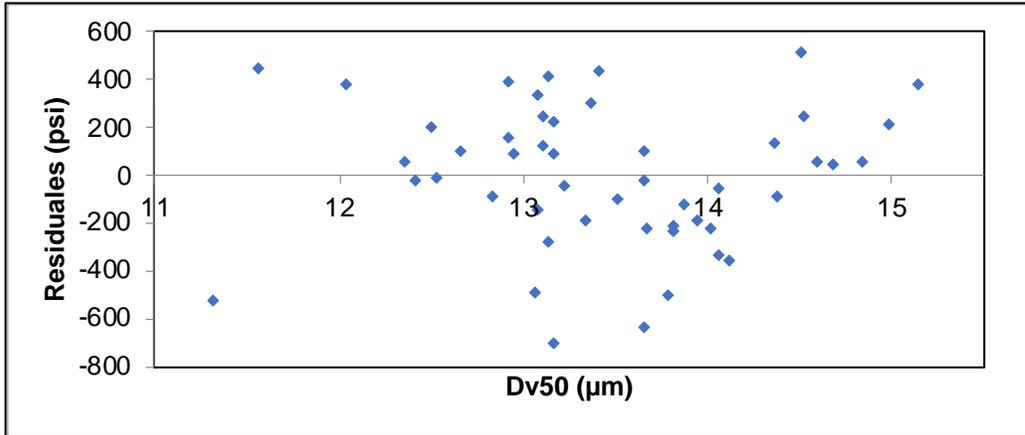
Muestra	R28 Predichas	Residuales
1	4 720	-632
2	4 680	-499
3	4 550	-352
4	4 910	-702
5	4 570	-337
6	4 270	63
7	4 450	-93
8	4 590	-216
9	4 330	51
10	4 610	-192
11	4 210	213
12	4 660	-234
13	4 370	63
14	4 660	-210
15	4 950	-491
16	4 720	-217
17	4 570	-58
18	4 640	-121
19	4 160	377
20	4 450	134
21	4 920	-282
22	4 390	248
23	4 840	-188
24	4 780	-101
25	4 720	-22
26	4 950	-141
27	4 720	99

Continuación de la tabla XIX.

28	4 890	-41
29	4 400	515
30	5 040	-89
31	4 910	87
32	4 930	120
33	4 990	94
34	5 620	-523
35	4 830	298
36	4 910	230
37	5 150	-9
38	5 010	154
39	5 200	-17
40	4 930	248
41	5 100	105
42	4 820	440
43	5 220	53
44	4 940	334
45	4 920	418
46	5 160	208
47	5 000	394
48	5 340	376
49	5 520	445

Fuente: elaboración propia.

Figura 7. **Gráfica de residuales**



Fuente: elaboración propia.

3.8.4.3. **Dv 90**

A continuación, se presentan los resultados para la variable Dv90.

Tabla XX. **Regresión lineal para la resistencia a 28 días en función de la variable Dv 90**

Estadística de regresión	
R Múltiple	0,74
R Cuadrado	0,54
R Cuadrado ajustado	0,53
Error estándar	296,63
Observaciones	49

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Coefficientes de la ecuación de la regresión lineal para la resistencia a 28 días en función de la variable Dv 90**

	Coefficientes	Error estándar	P-valor
Intercept	11 665,95	921,74	9,48E-17
Dv50	-155,16	20,81	1,67E-09

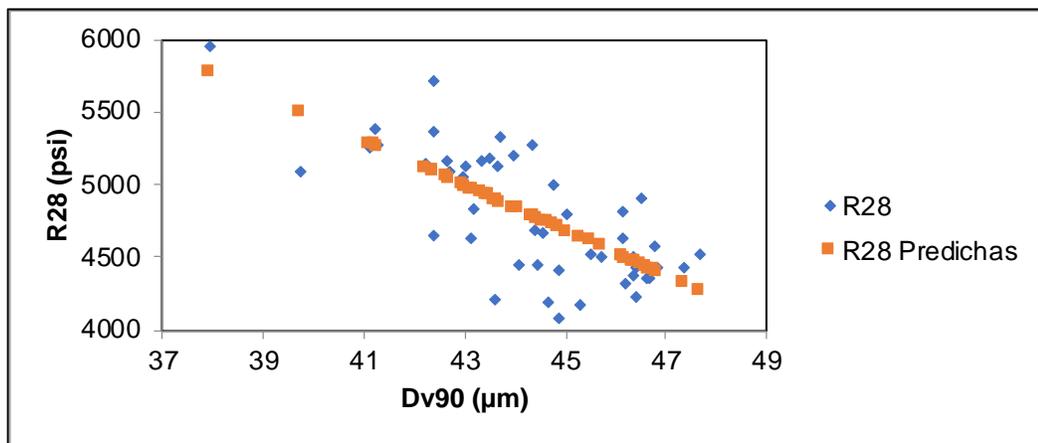
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Ecuación lineal obtenida por medio de la regresión lineal de la resistencia a 28 días en función de la variable Dv 90**

$$R28 = -155,16 Dv\ 90 + 11\ 665,95$$

Fuente: elaboración propia.

Figura 8. **Gráfica de la resistencia a 28 días, experimentales y predichas, en función del tamaño de partícula**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Análisis de varianza para la regresión lineal de la resistencia a 28 días en función de la variable Dv 90**

	df	Suma de cuadrados	Media de Cuadrados	F	Valor Crítico de F
Regresión	1	4892134,33	4892134,33	55,60	1,67E-09
Residual	47	4135430,47	87987,88		
Total	48	9027564,79			

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Resistencia a 28 días predichas y residuales para la regresión lineal con la variable Dv 90**

Muestra	R28 Predichas	Residuales
1	4 700	-612
2	4 640	-466
3	4 740	-546
4	4 900	-690
5	4 470	-237
6	4 500	-163
7	4 430	-68
8	4 430	-62
9	4 480	-94
10	4 700	-281
11	4 320	108
12	4 470	-38
13	4 400	32
14	4 830	-378
15	4 770	-310

Continuación de la tabla XXIV.

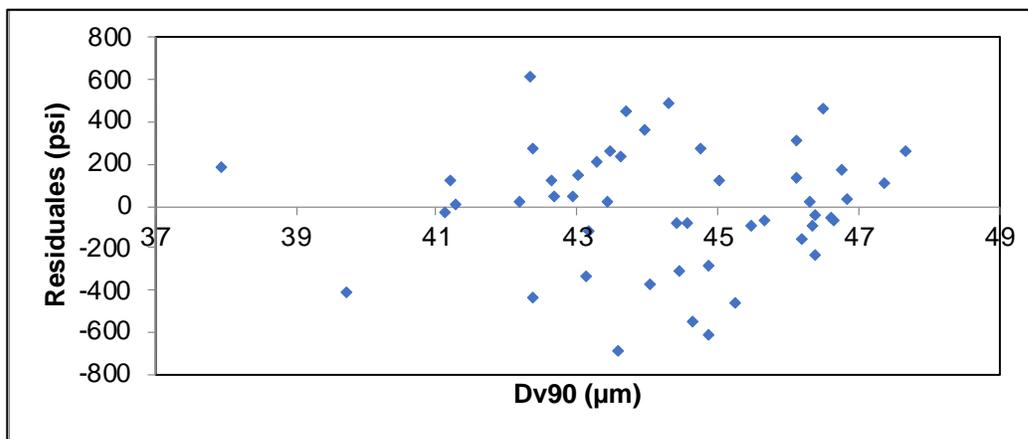
16	4 480	23
17	4 580	-67
18	4 610	-90
19	4 270	267
20	4 410	176
21	4 970	-334
22	4 510	133
23	5 090	-433
24	4 750	-76
26	4 680	124
27	4 510	312
28	4 970	-119
29	4 450	467
30	4 920	22
31	4 720	275
32	5 000	51
33	5 040	45
34	5 500	-409
35	4 890	235
36	4 990	148
37	5 120	26
38	4 950	214
39	5 050	127
40	4 920	258
41	4 840	364
42	5 290	-29

Continuación de la tabla XXIV.

43	5 260	10
44	4 790	489
45	4 880	454
46	5 090	280
47	5 270	126
48	5 090	621
49	5 780	188

Fuente: elaboración propia.

Figura 9. **Gráfica de residuales**



Fuente: elaboración propia.

3.8.4.4. Diferencia de medias para resultados obtenidos de la fineza 325 por medio del granulómetro láser y de la malla de 45 μm

A continuación, se muestran los resultados estadísticos obtenidos para la fineza 325.

Tabla XXV. **Valor Z determinado para los promedios de las finezas 325 de todas las muestras**

	Malla 45 μm	Granulómetro láser
Media	94,59	90,39
Varianza conocida	2,20	1,44
Observaciones	49	49
Diferencia de media hipotetizada	0	
z	15,43	
P(Z\leqz) una cola	0	

Continuación de la tabla XXV.

z Crítica una cola	1,64	
P(Z\leqz) dos colas	0	
z Crítica dos colas	1,96	

Fuente: elaboración propia.

3.8.4.5. Diferencia de medias para resultados obtenidos de la superficie específica Blaine por medio del granulómetro láser y del permeabilímetro

A continuación, se muestran los resultados estadísticos para la Blaine.

Tabla XXVI. Valor Z determinado para los promedios de las áreas específicas Blaine de todas las muestras

	Permeabilímetro	MYTOS
Media	4 247,90	4 065,93
Varianza conocida	42 605,22	31 499,44
Observaciones	49	49
Diferencia de media hipotetizada	0	
Z	4,68	
P(Z<=z) una cola	0	
z Crítica una cola	1,64	
P(Z<=z) dos colas	0	
z Crítica dos colas	1,96	

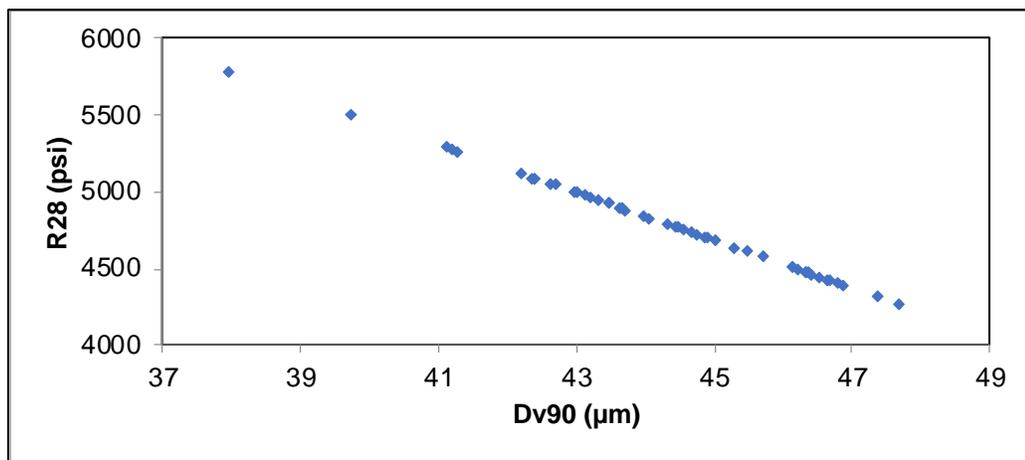
Fuente: elaboración propia.

4. RESULTADOS

Se realizó una regresión lineal para 49 datos de resistencia con el tamaño de partícula de cada muestra obtenido por medio del uso del granulómetro láser. La resistencia a 28 días del cemento tipo UG fue descrita mejor estadísticamente por medio de la variable de tamaño de partícula $D_v 90$.

El modelo de regresión obtenido de la resistencia a 28 días en función del tamaño de partícula $D_v 90$ se describe a continuación:

Figura 10. **Gráfica de la ecuación de regresión de la resistencia a 28 días en función de la variable de tamaño de partícula $D_v 90$**



Fuente: elaboración propia, con base en datos de resistencia predichos de la tabla XXIV.

Tabla XXVII. **Ecuación de regresión lineal y coeficiente de correlación para la resistencia a 28 días en función del tamaño de partícula Dv 90**

Ecuación de regresión	$R_{28} = -155,16 Dv\ 90 + 11\ 665,95$
R²	1

Fuente: elaboración propia.

A partir del modelo matemático obtenido se procedió a estimar valores de 10 muestra nuevas aleatorias para poder compararlos con los valores experimentales obtenidos con la máquina de compresión. Dichos valores se presentan a continuación:

Tabla XXVIII. **Datos de resistencia a 28 días estimados con la ecuación de regresión lineal en comparación con datos experimentales de muestras aleatorias nuevas**

Muestra	Dv90 (µm)	R28 (psi)	R28 Estimada (psi)	CV
1	45,81	4 210	4 560	5,70 %
2	40,55	4 630	5 370	10,52 %
3	46,58	4 210	4 440	3,67 %
4	45,96	4 350	4 540	2,98 %
5	46,99	4 400	4 380	0,37 %
6	45,46	4 290	4 610	5,07 %
7	45,96	4 530	4 540	0,05 %
8	45,63	4 730	4 590	2,14 %
9	45,81	4 620	4 560	0,89 %
10	47,33	4 510	4 320	3,00 %

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. **Comparación entre medias de los valores de la fineza 325 obtenidos por medio del granulómetro láser y la malla 45 μm**

	Malla 45 μm	Granulómetro láser
Media	94,59	90,39
z	15,43	
z Crítica una cola	1,64	
z Crítica dos colas	1,96	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. **Comparación entre medias de los valores del área específica Blaine obtenidos por medio del granulómetro láser y el permeabilímetro**

	Permeabilímetro	MYTOS
Media	4 247,90	4 065,93
z	4,68	
z Crítica una cola	1,64	
z Crítica dos colas	1,96	

Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En este trabajo de investigación se evaluó el efecto de la fineza en la resistencia a 28 días del cemento tipo UG a través de pruebas realizadas por el granulómetro laser a diferentes muestras de cemento, midiendo el tamaño de partícula a cada muestra obtenida. El tamaño de partícula se dividió en tres partes conocidas como percentiles 10, 50 y 90. Al ser el diámetro de un volumen determinado se denotan como $D_v 10$, $D_v 50$ y $D_v 90$, respectivamente. El fin de la medición del tamaño de partícula fue el de poder obtener un modelo predictor de la resistencia a 28 días con el tamaño de partícula que mejor describiera el modelo, tanto estadística como físicamente.

Por otro lado, la importancia de la fineza de la malla de $45 \mu\text{m}$ y del área específica Blaine en el proceso de elaboración de cemento en algunas ocasiones es de carácter crítico, por ello se vio la necesidad de poder analizar la posibilidad de automatizar el análisis de ambas pruebas con el granulómetro laser. Por ello, se compararon los resultados obtenidos de los análisis de la fineza 325 y Blaine con aquellos obtenidos con el granulómetro laser.

En la sección de análisis estadístico se define paso a paso la secuencia de análisis que se realizó a cada variable del tamaño de partícula. Se inició con un análisis de varianza y una regresión lineal múltiple a la resistencia tardía a 28 días del cemento tipo UG en función de todas las variables de tamaño de partícula. Dicho análisis se descartó debido a que no cumplía estadísticamente el P-valor, siendo mayor en las variables $D_v 10$ y $D_v 90$.

Por tanto, se procedió a determinar la correlación entre cada variable como se observa en las tablas IX, X y XI. Se obtuvo una correlación muy alta entre las variables Dv50 y Dv90, con un 88 %. Seguido, las variables Dv10 y Dv50 presentaron una correlación moderada, con un 56 %. Por último, las variables Dv10 y Dv90 presentaron una correlación baja con un 33 %. Sin embargo, en los tres casos las correlaciones obtenidas fueron mayores que un 23,8 %, el cual es la correlación que se debe superar debido al tamaño de la muestra para que sea estadísticamente significativo al nivel de significancia considerado. Lo cual significa que, al analizar la variable de resistencia tardía a 28 días en función de las tres variables, o incluso por pares, resultaría en un análisis con variables repetidas. Es por ello que se prosiguió a analizar la influencia que tiene cada variable en la resistencia tardía a 28 días.

El modelo de regresión lineal de la resistencia tardía a 28 días en función de la variable Dv10 tuvo una correlación del 7 %. Debido a esto se decidió descartar el análisis posterior, aunque en el análisis de varianza haya cumplido con los requerimientos de la F de Fisher y del P-valor.

Por otro lado, los análisis de varianza y regresión con las variables Dv50 y Dv90 son uniformes. Ambos obtuvieron valores estadísticamente significativos en el análisis de regresión. La correlación para ambos modelos de la resistencia tardía a 28 días en función de cada variable fue de un 54 %. Las diferencias entre cada análisis radican en el error estándar, en los valores del P-valor y en los coeficientes de cada modelo generado como se puede observar en las tablas XV, XVI, XX y XXI.

Las figuras 6 y 8 muestran el comportamiento de los valores experimentales de la resistencia tardía a 28 días de cada muestra en función del tamaño de partícula respectivo, así como también de los valores predichos

por el modelo de regresión obtenido con dichos valores experimentales. En ambos casos el modelo se ajustó de manera que su correlación fuera perfecta ($r = 1$).

En el análisis de varianza se obtuvieron valores bastante significativos por ambas variables, cabe resaltar que la F de Fisher calculado para la Dv90 fue mayor que el de la Dv50, lo cual se observa en las tablas XVIII y XXIII. Siendo este valor un referente para la elección de la variable Dv90 por encima de la variable Dv50.

Por último, se realizó un análisis de residuales para observar si el comportamiento del modelo lineal obtenido era adecuado. Dichos comportamientos se pueden apreciar en las figuras 7 y 9. En la figura 7, que representa el análisis de residuos de la variable Dv50, se puede apreciar como los valores se encuentran un poco esparcidos y no tan centralizados. En contraste con la figura 9, que representa el análisis de residuos de la variable Dv90, que muestra como los valores se encuentran menos esparcidos y como mantienen un rango horizontal centrado alrededor de cero. Sin embargo, en ambas gráficas se puede concluir que ambos modelos lineales se adecuan bien al fenómeno que se trata de describir.

En el apartado de resultados se puede apreciar la figura 10 que describe entonces el modelo obtenido para la resistencia tardía a 28 días en función del tamaño de partícula que mejor describiera el fenómeno, siendo la variable Dv90. Físicamente significa que del 90 % de la muestra, el tamaño de partícula más grande que lee el granulómetro laser describe a la resistencia tardía a 28 días del cemento tipo UG, por encima del tamaño más grande del 10 y 50 % de la muestra. Debido a esto los tamaños de partículas que se deberán obtener

oscilarán entre los 38 y 45 μm . El modelo lineal se ajustó a una correlación perfecta.

La tabla XXVIII muestra valores predichos utilizando el modelo lineal de la resistencia tardía a 28 días en función de la variable Dv_{90} . Se realizó el mismo procedimiento para las diez muestras aleatorias descrito en la sección 3.2.2 hasta el paso 5. Después, al obtener los datos del tamaño de partícula a través del granulómetro laser, se procedió a calcular la resistencia a 28 días utilizando el modelo. Después se obtuvieron los datos de la resistencia tardía a 28 días experimentales con los cubos utilizando la máquina de compresión. Finalmente, se compararon los resultados. Se tomó como referencia la norma ASTM C-109, la cual establece que, para resultados entre diferentes laboratorios, se acepta una variación máxima de 6,5 % para resistencias a 28 días en cementos tipo Portland. Como se muestra en la tabla 2 de dicha norma. Se decidió tomar la variación entre distintos laboratorios debido a que los equipos utilizados son diferentes.

En la tabla XXIX se puede observar el resultado de la prueba de hipótesis utilizando la Z de prueba, siendo mayor que la Z crítica por lo que se rechaza la hipótesis nula, debido a que sí existe una diferencia significativa entre los promedios obtenidos de las finezas 325 en el granulómetro laser y la malla de 45 μm con una significancia del 5 %.

De manera similar, en la tabla XXX se observa que la Z de prueba es mayor que la Z crítica, también se rechaza la hipótesis nula, habiendo una diferencia significativa entre los promedios obtenidos del área específica Blaine por medio del granulómetro laser y permeabilímetro con una significancia del 5 %.

Esto se debe a que los métodos en sí difieren en como calculan el porcentaje de pasante en la malla de 45 μm . En ambos métodos se obtiene el porcentaje de pasante en la malla 45 μm , pero a diferencia del método convencional utilizando la malla física, en la difracción laser se toma en cuenta el tamaño real de la partícula. Es decir, que si la partícula tuviera una figura alargada que pudiese pasar a través de la malla de manera vertical, ésta no se detectaría en el residuo para poder realizar un cálculo más exacto del porcentaje de pasante. Por otro lado, como se explica en el marco teórico, al ingresar la muestra en el dispersor, este es irradiado por una fuente de luz que detecta los tamaños de partícula en el detector a los diferentes percentiles, dando así un valor más exacto para el porcentaje de pasante. De la misma manera se compara el método de Blaine con el granulómetro laser.

Cabe resaltar que el método de determinación del tamaño de partícula, y por ende el de la fineza de 45 μm y Blaine utilizando el granulómetro láser es una herramienta que acelera el proceso de entrega de resultados con mayor confiabilidad, ya que se obtienen en cuestión de segundos, en comparación con los métodos convencionales que pueden llegar a tardar hasta 15 minutos y es ajena al error de las personas que analizan las muestras.

CONCLUSIONES

1. Se obtuvo una mejor correlación estadística con el análisis de tamaño de partícula Dv_{90} para determinar la resistencia tardía a 28 días, debido a que toma en cuenta el tamaño más grande de partícula del 90 % de la muestra.
2. La comparación entre los valores predichos por el modelo matemático, obtenido de la resistencia tardía a 28 días en función de la variable de tamaño de partícula Dv_{90} utilizando el granulómetro láser y los obtenidos experimentalmente utilizando la máquina de compresión, fue satisfactoria debido a que se encuentra en el rango de diferencia de unidades de compresión.
3. La prueba de hipótesis para diferencia de medias realizada a las mediciones de la fineza 325 por medio del granulómetro láser y la malla de 45 μm sugiere que las medias son diferentes entre sí, con una significancia del 5 %.
4. La prueba de hipótesis para diferencia de medias realizada a las mediciones del área específica Blaine por medio del granulómetro láser y el permeabilímetro sugiere que las medias son diferentes entre sí, con una significancia del 5 %.

RECOMENDACIONES

1. Realizar un estudio para evaluar la resistencia tardía a 28 días en función de más variables conocidas por tener un efecto significativo en tal edad, como por ejemplo porcentaje de C3S, C2S y cal libre en clínker, química de los aditivos, porcentaje de SO₃ óptimo.
2. Realizar un estudio más detallado de la fineza 325 del cemento tipo UG comparando el uso del granulómetro láser y del método de la malla de 45 µm, utilizando tiempos de entrega de resultados y errores de los equipos y analistas.
3. Realizar un estudio más detallado del área específica en el cemento tipo UG comparando el uso del granulómetro laser y del método del permeabilímetro, utilizando tiempos de entrega de resultados y errores de los equipos y analistas.

BIBLIOGRAFÍA

1. ANÓNIMO. *Dispersión de Mie.* [en línea]. <<http://rammb.cira.colostate.edu/wmovl/VRL/Tutorials/euromet/courses/spanish/satmet/s2400/s2400005.html>>. [Consulta: 3 de junio de 2019].
2. _____. *Superficie específica del cemento.* [en línea]. <<https://apuntesingenierocivil.blogspot.com/2010/10/superficie-especifica-del-cemento.html>>. [Consulta: 2 de febrero de 2020].
3. ASTM. *C109: standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens).* 2017. 5 p.
4. FRIAS, M., SÁNCHEZ, Manuel, LUXAN, M.; GARCÍA, N. Pascua. *Granulometría láser: estudio comparativo con las técnicas de tamizado y elutriación aplicado a materiales puzolánicos.* Madrid, España: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 1990. 52 p.
5. JAMES, Sean. *The relationship between the compressive strength of cement mortar and the chemical composition and fineness of cement.* Trabajo de graduación de Maestría de Ciencia en Ingeniería. Facultad de Ingeniería Civil, Universidad de Cape Town Sudáfrica, 1995. 158 p.

6. KAUFFMAN, George. Cement: Its chemistry and properties. Estados Unidos: En: *Journal of chemical education*. 80(6), 2003. 13 p.
7. LEVOGUER, Carl. *Particle sizing discussed, Malvern Instruments*. Alemania: 2012. 2 p.
8. LUJÁN, Brian. *Determinación de la relación diámetro promedio de partícula medida en un granulómetro laser y resistencias tardías para un cemento tipo 1, para la implementación de un sistema de medición en línea*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2007. 49 p.
9. Malvern Instruments. *A basic guide to particle characterization*. Guía del usuario, 2015. 23 p.
10. Malvern Panalytical. *Medición de las distribuciones de tamaño de partículas*. [en línea]. <<https://malvernpanalytical.com/es/products/measurement-type/particle-size>>. [Consulta: 3 de febrero de 2019].
11. MUÑOZ, Cinthia. *Análisis de la distribución del tamaño del cemento por el método de granulometría láser y su relación con las resistencias a través de los ensayos universales*. Trabajo de graduación de Ing. Industrial. Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Cuenca Ecuador, 2017. 38 p.
12. SYMPATEC. *Mytos operating instructions*. Alemania: Guía del usuario, 2009. 54 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. **Tabla de repeticiones de resistencias**

Muestra	PSI			
	Cubo 1	Cubo 2	Cubo 3	Promedio
1	4 142	3 993	4 142	4 092
2	4 220	4 177	4 132	4 176
3	4 115	4 127	4 335	4 193
4	4210	4113	4307	4210
5	4 310	3 941	4 450	4 233
6	4 313	4 315	4 371	4 333
7	4 365	4 391	4 315	4 357
8	4 459	4 327	4 326	4 371
9	4 323	4 406	4 417	4 382
10	4 417	4 456	4 391	4 421
11	4 383	4 460	4 436	4 426
12	4 431	4 440	4 414	4 428
13	4 543	4 488	4 254	4 429
14	4 502	4 581	4 277	4 453
15	4 436	4 456	4 478	4 457
16	4 693	4 412	4 396	4 500
17	4 538	4 580	4 413	4 510
18	4 598	4 617	4 345	4 520
19	4 572	4 363	4 665	4 533
20	4 587	4 557	4 610	4 585
21	4 673	4 599	4 646	4 639
22	4 740	4 752	4 427	4 640
23	4 626	4 466	4 872	4 655

Continuación del apéndice 1.

24	4 643	4 650	4 731	4 675
25	4 707	4 713	4 678	4 699
26	4 770	4 904	4 741	4 805
27	4 820	4 851	4 793	4 821
28	4 791	4 753	4 999	4 847
29	4 871	4 831	5 044	4 915
30	4 935	5 003	4 900	4 946
31	5 067	4 958	4 968	4 998
32	5 000	4 991	5 160	5 050
33	5 188	4 873	5 204	5 088
34	5 232	5 226	4 822	5 093
35	5 157	5 006	5 224	5 129
36	5 170	5 107	5 140	5 139
37	5 069	5 161	5 204	5 145
38	5 230	5 140	5 114	5 161
39	5 231	4 820	5 482	5 178
40	5 339	5 178	5 020	5 180
41	5 208	5 262	5 153	5 207
42	5 257	5 128	5 386	5 257
43	5 432	5 131	5 250	5 271
44	5 400	5 154	5 281	5 278
45	5 280	5 395	5 337	5 337
46	5 453	5 260	5 400	5 371
47	5 560	5 220	5 413	5 398
48	5 783	5 686	5 677	5 715
49	5 776	6 164	5 955	5 965

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Porcentaje de pasante 45 µm en granulómetro láser y Alpine**

Fineza (% pasante 45 µm)												
Muestra	Granulómetro láser MYTOS						Malla 45 µm					
	Rep 1	Rep 2	Rep 3	Promedio	SD	SE	Rep 1	Rep 2	Rep 3	Promedio	SD	SE
1	90,01	90,15	90,09	90,08	0,07	0,04	94,30	94,37	94,59	94,42	0,15	0,09
2	89,54	89,73	90,25	89,84	0,37	0,21	94,51	94,68	94,93	94,70	0,21	0,12
3	90,19	90,21	90,24	90,21	0,03	0,01	95,57	95,67	95,81	95,69	0,12	0,07
4	90,7	90,69	90,87	90,75	0,10	0,06	94,57	94,68	94,75	94,67	0,09	0,05
5	89,54	88,89	89,04	89,16	0,34	0,20	93,45	93,78	93,36	93,52	0,22	0,13
6	89,17	89,27	89,25	89,23	0,05	0,03	94,05	94,30	94,18	94,16	0,13	0,07
7	88,86	88,96	89,03	88,95	0,09	0,05	93,54	93,63	93,85	93,68	0,16	0,09
8	89,03	88,97	89,02	89,01	0,03	0,02	95,33	95,77	95,83	95,66	0,27	0,16
9	89,03	89,27	89,14	89,15	0,12	0,07	93,50	94,01	94,05	93,84	0,31	0,18
10	90,06	90,05	90,09	90,07	0,02	0,01	95,00	95,23	94,93	95,06	0,16	0,09
11	88,34	88,56	88,48	88,46	0,11	0,06	93,88	94,11	94,02	94,00	0,12	0,07
12	89,83	89,12	88,63	89,19	0,60	0,35	90,63	90,88	90,89	90,80	0,15	0,09
13	88,75	88,87	88,85	88,82	0,06	0,04	94,02	94,33	94,30	94,21	0,17	0,10
14	90,47	90,58	90,62	90,56	0,08	0,04	93,99	93,65	93,71	93,79	0,18	0,10
15	90,25	90,28	90,36	90,30	0,06	0,03	94,31	94,53	94,68	94,50	0,19	0,11
16	89,03	89,19	89,5	89,24	0,24	0,14	92,79	92,45	92,72	92,68	0,18	0,10
17	89,54	89,56	89,65	89,58	0,06	0,03	94,53	94,98	94,91	94,80	0,24	0,14
18	89,62	89,8	89,72	89,71	0,09	0,05	94,98	95,20	95,25	95,14	0,14	0,08
19	88,15	88,32	88,25	88,23	0,09	0,05	93,55	93,34	93,76	93,57	0,21	0,12
20	88,83	88,77	89,07	88,89	0,16	0,09	92,58	92,39	92,79	92,60	0,20	0,12
21	91,09	91,07	90,94	91,03	0,08	0,05	96,12	96,21	96,19	96,17	0,05	0,03
22	89,33	89,29	89,26	89,29	0,04	0,02	93,61	93,57	93,78	93,65	0,11	0,06
23	91,29	91,45	91,44	91,39	0,09	0,05	95,66	95,73	95,53	95,66	0,10	0,06
24	90,12	90,25	90,36	90,24	0,12	0,07	94,64	94,83	95,10	94,86	0,23	0,13
25	90,36	90,34	90,31	90,34	0,03	0,01	95,01	95,34	95,03	95,12	0,19	0,11
26	90,02	90,01	89,94	89,99	0,04	0,03	87,87	88,19	87,99	88,02	0,16	0,09
27	89,4	89,24	89,34	89,33	0,08	0,05	93,12	93,43	93,91	93,49	0,40	0,23
28	90,99	90,97	91,6	91,01	0,36	0,21	95,52	95,55	96,01	95,69	0,27	0,16
29	89,08	88,99	89,06	89,04	0,05	0,03	94,31	94,70	94,52	94,51	0,20	0,11
30	90,86	90,77	90,91	90,85	0,07	0,04	94,49	95,08	95,08	94,88	0,34	0,20

Continuación del apéndice 2.

31	90,08	90,18	90,17	90,14	0,06	0,03	94,54	94,89	94,74	94,72	0,18	0,10
32	91,02	91,08	91,11	91,07	0,05	0,03	93,52	93,89	93,69	93,70	0,19	0,11
33	91,23	91,4	91,16	91,26	0,12	0,07	95,60	95,43	95,80	95,61	0,19	0,11
34	92,79	92,74	92,97	92,83	0,12	0,07	94,99	95,93	95,44	95,45	0,47	0,27
35	90,75	90,89	90,64	90,76	0,13	0,07	94,31	94,36	94,43	94,37	0,06	0,03
36	91,07	91,15	91,06	91,09	0,05	0,03	95,21	95,28	95,00	95,16	0,15	0,08
37	91,45	91,52	91,47	91,48	0,04	0,02	95,81	95,98	96,12	95,97	0,16	0,09
38	90,92	90,92	90,95	90,93	0,02	0,01	95,10	95,53	95,27	95,30	0,22	0,13
39	91,19	91,29	91,3	91,26	0,06	0,04	94,67	95,04	94,93	94,88	0,19	0,11
40	90,84	90,7	90,99	90,84	0,15	0,08	95,03	94,97	95,35	95,12	0,20	0,12
41	90,49	90,58	90,61	90,56	0,06	0,04	94,55	94,41	95,04	94,67	0,33	0,19
42	92,2	92,35	92,24	92,26	0,08	0,04	95,88	95,92	96,07	95,96	0,10	0,06
43	91,97	92,13	92,11	92,07	0,09	0,05	95,83	95,99	95,92	95,91	0,08	0,05
44	90,39	90,4	90,35	90,38	0,03	0,02	94,76	94,57	94,98	94,77	0,21	0,12
45	90,75	90,62	90,74	90,70	0,07	0,04	95,38	95,65	95,94	95,66	0,28	0,16
46	91,35	91,4	91,4	91,38	0,03	0,02	95,43	95,57	95,81	95,60	0,19	0,11
47	91,68	91,85	94,08	92,54	1,34	0,77	95,34	95,47	95,55	95,45	0,11	0,06
48	91,45	91,37	91,22	91,35	0,12	0,07	95,00	95,05	94,81	94,95	0,13	0,07
49	94,03	93,96	94,11	94,03	0,08	0,04	98,33	98,01	98,19	98,18	0,16	0,09

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Datos de Blaine en granulómetro láser y permeabilímetro

Blaine (cm ² /g)											
Granulómetro láser MYTOS						Permeabilímetro					
Rep 1	Rep 2	Rep 3	Promedio	SD	SE	Rep 1	Rep 2	Rep 3	Promedio	SD	SE
4 060	4 089	4 094	4 081	18,36	10,60	4 368	4 470	4 421	4 420	51,01	29,45
4 150	4 110	4 082	4 114	34,18	19,73	4 489	4 376	4 387	4 417	62,31	35,97
3 930	3 954	3 943	3 942	12,01	6,94	4 078	4 099	4 010	4 062	46,52	26,86
3 960	3 974	3 980	3 971	10,26	5,93	4 100	4 228	4 098	4 142	74,48	43,00
4 240	3 930	3 889	4 020	191,91	110,80	4 170	4 120	4 080	4 123	45,09	26,03

Continuación del apéndice 3.

3 401	3 427	3 434	3 421	17,39	10,04	4 100	4 150	4 109	4 120	26,65	15,39
3 958	3 990	3 975	3 974	16,01	9,24	4 112	4 190	4 099	4 134	49,22	28,42
4 076	4 099	4 099	4 092	13,28	7,67	4 307	4 402	4 390	4 366	51,73	29,87
3 867	3 834	3 807	3 836	30,05	17,35	4 109	4 250	4 220	4 193	74,28	42,88
4 000	3 998	4 016	4 005	9,87	5,70	4 302	4 421	4 399	4 371	63,32	36,56
3 839	3 869	3 896	3 868	28,51	16,46	4 258	4 290	4 355	4 301	49,43	28,54
4 000	4 008	3 961	3 990	25,15	14,52	4 479	4 410	4 353	4 414	63,10	36,43
3 940	3 959	3 974	3 957	17,04	9,84	4 247	4 383	4 301	4 310	68,48	39,54
4 023	4 058	4 041	4 040	17,50	10,11	4 093	4 140	4 100	4 111	25,36	14,64
4 227	4 208	4 183	4 206	22,07	12,74	4 545	4 459	4 480	4 495	44,84	25,89
4 063	4 093	4 078	4 078	15,00	8,66	4 433	4 518	4 580	4 510	73,80	42,61
4 003	4 073	4 027	4 034	35,57	20,54	3 945	4 001	3 978	3 975	28,15	16,25
4 100	4 116	4 109	4 108	8,02	4,63	4 385	4 275	4 480	4 380	102,59	59,23
3 615	3 645	3 629	3 630	15,01	8,67	3 286	3 446	3 324	3 352	83,59	48,26
3 963	3 995	3 980	3 979	16,01	9,24	3 789	3 867	3 993	3 883	102,94	59,43
4 169	4 157	4 205	4 177	24,98	14,42	4 309	4 367	4 463	4 380	77,78	44,90
3 901	3 934	3 925	3 920	17,06	9,85	4 119	4 365	4 299	4 261	127,33	73,51
4 180	4 165	4 097	4 147	44,23	25,54	4 467	4 683	4 577	4 576	108,01	62,36
4 067	4 094	4 079	4 080	13,53	7,81	4 070	4 335	4 156	4 187	135,19	78,05
4 030	4 017	4 053	4 033	18,23	10,53	4 239	4 354	4 545	4 379	154,56	89,24
4 164	4 177	4 160	4 167	8,89	5,13	4 198	4 230	4 321	4 250	63,81	36,84
4 066	4 124	4 093	4 094	29,02	16,76	4 010	4 290	4 145	4 148	140,03	80,85
4 102	4 150	4 129	4 127	24,06	13,89	4 382	4 589	4 450	4 476	105,51	60,92
3 980	3 993	3 988	3 987	6,56	3,79	4 213	4 400	4 198	4 270	112,54	64,98
4 153	4 185	4 155	4 164	17,93	10,35	4 375	4 567	4 498	4 480	97,26	56,15
4 102	4 121	4 106	4 110	10,02	5,78	4 195	4 350	4 236	4 260	80,31	46,37
4 056	4 095	4 079	4 077	19,60	11,32	4 086	4 137	4 151	4 125	34,21	19,75
4 132	4 168	4 139	4 146	19,09	11,02	4 138	4 325	4 203	4 222	94,94	54,81
4 501	4 517	4 496	4 505	10,97	6,33	4 806	4 504	4 612	4 641	153,03	88,35
3 918	3 883	3 918	3 906	20,21	11,67	4 093	4 235	4 073	4 134	88,33	50,99
4 066	4 082	4 070	4 073	8,33	4,81	4 006	4 289	4 276	4 190	159,77	92,24
4 255	4 212	4 245	4 237	22,50	12,99	4 158	4 310	4 221	4 230	76,37	44,09
4 148	4 175	4 152	4 158	14,57	8,41	4 310	4 453	4 284	4 349	91,00	52,54

Continuación del apéndice 3.

4 349	4 313	4 306	4 323	23,07	13,32	4 583	4 393	4 434	4 470	99,98	57,73
4 090	4 107	4 057	4 085	25,42	14,68	4 135	4 350	4 430	4 305	152,56	88,08
4 224	4 210	4 222	4 219	7,57	4,37	4 210	4 350	4 340	4 300	78,10	45,09
3 966	3 950	3 945	3 954	10,97	6,33	4 023	4 084	4 159	4 089	68,12	39,33
4 132	4 227	4 253	4 204	63,69	36,77	3 923	4 056	3 969	3 983	67,55	39,00
4 155	4 137	4 109	4 134	23,18	13,38	3 989	4 083	4 169	4 080	90,03	51,98
4 065	4 054	4 120	4 080	35,36	20,42	4 163	4 194	4 250	4 203	44,09	25,46
4 264	4 251	4 209	4 241	28,75	16,60	4 111	4 229	4 201	4 180	61,65	35,60
3 897	3 783	3 790	3 823	63,89	36,89	4 101	4 430	4 368	4 300	174,82	100,93
4 295	4 337	4 349	4 327	28,35	16,37	4 356	4 235	4 310	4 300	61,08	35,26
4 357	4 380	4 425	4 387	34,59	19,97	4 285	4 302	4 312	4 300	13,65	7,88

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. Promedio de datos de tamaño de partícula, resistencia, fineza y Blaine

Tamaño de partícula (μm) y resistencia a 28 días (psi)					Fineza		Blaine	
Muestra	Dv10	Dv50	Dv90	R28	Alpine	Mytos	Permeabilímetro	Mytos
					1	1,710	13,65	44,87
2	1,680	13,78	45,27	4176	94,7	89,84	4417	4114
3	1,780	14,12	44,65	4193	95,69	90,21	4062	3942
4	1,810	13,16	43,61	4210	94,67	90,75	4142	3971
5	1,733	14,05	46,38	4233	93,52	89,16	4123	4020
6	2,290	14,84	46,21	4333	94,16	89,23	4120	3421
7	1,740	14,37	46,67	4357	93,68	88,95	4134	3974
8	1,680	14,01	46,62	4371	95,66	89,01	4366	4092
9	1,830	14,68	46,34	4382	93,84	89,15	4193	3836
10	1,740	13,94	44,88	4421	95,06	90,07	4371	4005
11	1,790	14,99	47,36	4426	94,00	88,46	4301	3868
12	1,753	13,81	46,41	4428	90,80	89,19	4414	3990

Continuación del apéndice 4.

13	1,740	14,59	46,85	4429	94,21	88,82	4310	3957
14	1,730	13,81	44,05	4453	93,79	90,56	4111	4040
15	1,653	13,06	44,46	4457	94,50	90,30	4495	4206
16	1,707	13,67	46,33	4500	92,68	89,24	4510	4078
17	1,720	14,06	45,69	4510	94,8	89,58	3975	4034
18	1,680	13,87	45,48	4520	95,14	89,71	4380	4108
19	2,010	15,14	47,69	4533	93,57	88,23	3352	3630
20	1,740	14,37	46,77	4585	92,60	88,89	3883	3979
21	1,673	13,13	43,14	4639	96,17	91,03	4380	4177
22	1,770	14,52	46,14	4640	93,65	89,29	4261	3920
23	1,680	13,34	42,40	4655	95,66	91,39	4576	4147
24	1,710	13,51	44,57	4675	94,86	90,24	4187	4080
25	1,737	13,66	44,42	4699	95,12	90,34	4379	4033
26	1,677	13,07	45,02	4805	88,02	89,99	4250	4167
27	1,697	13,66	46,13	4821	93,49	89,33	4148	4094
28	1,700	13,22	43,18	4847	95,69	91,01	4476	4127
29	1,730	14,50	46,52	4915	94,51	89,04	4270	3987
30	1,693	12,84	43,45	4946	94,88	90,85	4480	4164
31	1,707	13,16	44,75	4998	94,72	90,14	4260	4110
32	1,733	13,11	42,97	5050	93,70	91,07	4125	4077
33	1,693	12,94	42,69	5088	95,61	91,26	4222	4146
34	1,573	11,31	39,73	5093	95,45	92,83	4641	4505
35	1,853	13,37	43,65	5129	94,37	90,76	4134	3906
36	1,733	13,17	43,02	5139	95,16	91,09	4190	4073
37	1,660	12,52	42,19	5145	95,97	91,48	4230	4237
38	1,690	12,91	43,31	5161	95,30	90,93	4349	4158
39	1,613	12,42	42,63	5178	94,88	91,26	4470	4323
40	1,733	13,11	43,47	5180	95,12	90,84	4305	4085
41	1,663	12,66	43,98	5207	94,67	90,56	4300	4219
42	1,807	13,41	41,12	5257	95,96	92,26	4089	3954
43	1,670	12,36	41,28	5271	95,91	92,07	3983	4204
44	1,700	13,07	44,32	5278	94,77	90,38	4080	4134
45	1,733	13,14	43,72	5337	95,66	90,70	4203	4080
46	1,673	12,50	42,37	5371	95,60	91,38	4180	4241

Continuación del apéndice 4.

47	1,970	12,92	41,21	5398	95,45	92,54	4300	3823
48	1,627	12,04	42,36	5715	94,95	91,35	4300	4327
49	1,627	11,56	37,96	5965	98,18	94,03	4300	4387

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. Repeticiones de tamaños de partículas

Mues- tra	Repetición 1			Repetición 2			Repetición 3			Promedio			Desviación estándar			SE		
	Dv10	Dv50	Dv90	Dv10	Dv50	Dv90	Dv10	Dv50	Dv90	Dv10	Dv50	Dv90	Dv10	Dv50	Dv90	Dv10	Dv50	Dv90
1	1,71	13,55	44,72	1,68	13,64	44,87	1,74	13,76	45,02	1,71	13,65	44,87	0,030	0,105	0,150	0,017	0,061	0,087
2	1,66	13,78	45,22	1,67	13,75	45,28	1,71	13,81	45,31	1,68	13,78	45,27	0,026	0,030	0,046	0,015	0,017	0,026
3	1,76	14,00	44,25	1,76	14,24	44,60	1,82	14,12	45,10	1,78	14,12	44,65	0,035	0,120	0,427	0,020	0,069	0,247
4	1,80	13,17	43,20	1,81	13,17	43,55	1,81	13,14	44,08	1,81	13,16	43,61	0,006	0,017	0,443	0,003	0,010	0,256
5	1,64	13,20	45,78	1,77	14,46	46,79	1,79	14,50	46,56	1,73	14,05	46,38	0,081	0,739	0,529	0,047	0,427	0,306
6	2,25	14,84	46,20	2,27	14,85	46,19	2,35	14,83	46,26	2,29	14,84	46,21	0,053	0,010	0,038	0,031	0,006	0,022
7	1,73	14,30	46,40	1,74	14,39	46,67	1,74	14,42	46,94	1,74	14,37	46,67	0,006	0,062	0,270	0,003	0,036	0,156
8	1,68	14,00	46,20	1,67	14,10	46,40	1,68	13,95	47,26	1,68	14,01	46,62	0,006	0,076	0,563	0,003	0,044	0,325
9	1,84	14,40	46,30	1,81	14,88	46,25	1,84	14,68	46,47	1,83	14,68	46,34	0,017	0,241	0,115	0,010	0,139	0,067
10	1,73	13,80	44,40	1,73	13,90	44,56	1,75	14,12	45,68	1,74	13,94	44,88	0,012	0,164	0,697	0,007	0,095	0,403
11	1,76	15,00	47,16	1,81	14,90	47,35	1,80	14,98	47,57	1,79	14,99	47,36	0,026	0,053	0,205	0,015	0,031	0,118
12	1,76	13,61	45,31	1,74	13,80	46,56	1,76	14,03	47,35	1,75	13,81	46,41	0,012	0,210	1,029	0,007	0,121	0,594
13	1,73	14,39	46,80	1,74	14,55	47,01	1,73	14,73	46,74	1,74	14,59	46,85	0,006	0,170	0,142	0,003	0,098	0,082
14	1,73	13,77	44,05	1,71	13,78	44,03	1,75	13,88	44,04	1,73	13,81	44,05	0,020	0,061	0,010	0,012	0,035	0,006
15	1,64	13,04	44,55	1,65	13,06	44,49	1,67	13,09	44,35	1,65	13,06	44,46	0,015	0,025	0,103	0,009	0,015	0,059
16	1,71	13,75	46,70	1,70	13,65	46,42	1,71	13,61	45,88	1,71	13,67	46,33	0,006	0,072	0,417	0,003	0,042	0,241
17	1,70	14,03	45,40	1,74	14,05	45,50	1,72	14,10	46,17	1,72	14,06	45,69	0,020	0,036	0,419	0,012	0,021	0,242
18	1,67	13,87	45,48	1,67	13,85	45,30	1,69	13,87	45,66	1,68	13,87	45,48	0,012	0,012	0,180	0,007	0,007	0,104
19	2,03	15,14	47,39	2,00	15,16	47,65	2,00	15,16	48,03	2,01	15,14	47,69	0,017	0,012	0,322	0,010	0,007	0,186
20	1,75	14,39	46,88	1,73	14,38	46,96	1,74	14,33	46,48	1,74	14,37	46,77	0,010	0,032	0,257	0,006	0,019	0,148
21	1,68	13,14	43,03	1,68	13,18	43,07	1,66	13,08	43,31	1,67	13,13	43,14	0,012	0,050	0,151	0,007	0,029	0,087
22	1,75	14,48	46,00	1,76	14,49	46,10	1,79	14,59	46,32	1,77	14,52	46,14	0,021	0,061	0,164	0,012	0,035	0,095
23	1,66	13,34	42,05	1,68	13,36	42,15	1,69	13,35	43,00	1,68	13,34	42,40	0,015	0,010	0,522	0,009	0,006	0,301

Continuación del apéndice 5.

24	1,72	13,56	44,79	1,70	13,48	44,55	1,71	13,50	44,36	1,71	13,51	44,57	0,010	0,042	0,215	0,006	0,024	0,124
25	1,74	13,65	44,38	1,74	13,70	44,41	1,73	13,63	44,46	1,74	13,66	44,42	0,006	0,036	0,040	0,003	0,021	0,023
26	1,68	13,06	44,96	1,67	13,06	44,98	1,68	13,09	45,11	1,68	13,07	45,02	0,006	0,017	0,081	0,003	0,010	0,047
27	1,71	13,70	46,02	1,68	13,60	46,27	1,70	13,67	46,10	1,70	13,66	46,13	0,015	0,051	0,128	0,009	0,030	0,074
28	1,72	13,20	42,90	1,71	13,22	43,15	1,71	13,22	43,49	1,70	13,22	43,18	0,006	0,012	0,296	0,003	0,007	0,171
29	1,73	14,50	46,32	1,72	14,49	46,45	1,75	14,50	46,79	1,73	14,50	46,52	0,015	0,006	0,243	0,009	0,003	0,140
30	1,70	12,85	43,43	1,68	12,82	43,60	1,70	12,84	43,33	1,69	12,84	43,45	0,012	0,015	0,137	0,007	0,009	0,079
31	1,71	13,17	44,86	1,70	13,14	44,69	1,71	13,17	44,70	1,71	13,16	44,75	0,006	0,017	0,095	0,003	0,010	0,055
32	1,75	13,15	43,06	1,72	13,08	42,94	1,73	13,10	42,90	1,73	13,11	42,97	0,015	0,036	0,083	0,009	0,021	0,048
33	1,68	12,92	42,82	1,70	12,96	42,61	1,70	12,95	42,63	1,69	12,94	42,69	0,012	0,021	0,116	0,007	0,012	0,067
34	1,57	11,31	39,77	1,57	11,31	39,87	1,58	11,32	39,55	1,57	11,31	39,73	0,006	0,006	0,164	0,003	0,003	0,095
35	1,84	13,36	43,66	1,88	13,38	43,43	1,84	13,37	43,85	1,85	13,37	43,65	0,023	0,010	0,210	0,013	0,006	0,121
36	1,74	13,17	43,06	1,73	13,15	42,94	1,73	13,18	43,07	1,73	13,17	43,02	0,006	0,015	0,072	0,003	0,009	0,042
37	1,65	12,49	42,25	1,67	12,56	42,10	1,66	12,52	42,23	1,66	12,52	42,19	0,010	0,035	0,081	0,006	0,020	0,047
38	1,69	12,93	43,33	1,68	12,88	43,32	1,70	12,92	43,27	1,69	12,91	43,31	0,010	0,026	0,032	0,006	0,015	0,019
39	1,62	12,46	42,70	1,62	12,41	42,37	1,60	12,38	42,83	1,61	12,42	42,63	0,012	0,040	0,237	0,007	0,023	0,137
40	1,73	13,06	43,45	1,72	13,10	43,74	1,75	13,16	43,21	1,73	13,11	43,47	0,015	0,050	0,265	0,009	0,029	0,153
41	1,66	12,68	44,11	1,67	12,69	43,94	1,66	12,61	43,88	1,66	12,66	43,98	0,006	0,044	0,119	0,003	0,025	0,069
42	1,80	13,40	41,20	1,81	13,40	41,02	1,81	13,42	41,14	1,81	13,41	41,12	0,006	0,012	0,092	0,003	0,007	0,053
43	1,66	12,32	41,41	1,67	12,36	41,20	1,68	12,39	41,23	1,67	12,36	41,28	0,010	0,035	0,114	0,006	0,020	0,066
44	1,69	13,04	44,30	1,70	13,06	44,29	1,71	13,12	44,37	1,70	13,07	44,32	0,010	0,042	0,044	0,006	0,024	0,025
45	1,74	13,15	43,62	1,75	13,18	43,87	1,71	13,09	43,67	1,73	13,14	43,72	0,021	0,046	0,132	0,012	0,026	0,076
46	1,65	12,42	42,43	1,69	12,55	42,34	1,68	12,53	42,35	1,67	12,50	42,37	0,021	0,070	0,049	0,012	0,040	0,028
47	1,90	12,86	41,86	2,00	13,05	41,64	2,01	12,84	40,13	1,97	12,92	41,21	0,061	0,116	0,942	0,035	0,067	0,544
48	1,64	12,08	42,15	1,62	12,03	42,32	1,62	12,01	42,61	1,63	12,04	42,36	0,012	0,036	0,233	0,007	0,021	0,134
49	1,64	11,62	37,93	1,63	11,58	38,06	1,61	11,49	37,88	1,63	11,56	37,96	0,015	0,067	0,093	0,009	0,038	0,054

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. Permeabilímetro Blaine



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. **Granulómetro láser MYTOS utilizado para medir tamaño de partícula, fineza 45 μm y Blaine**



Fuente: elaboración propia.

