



ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSGRADO

**DETERMINACIÓN DE LA PERMEABILIDAD DEL CONCRETO CONTROLADA
POR LAS ADICIONES ULTRAFINAS**

Línea de investigación:

Polímeros naturales, sintéticos y funcionales

Tesis para optar el grado académico de Doctora en Ingeniería Civil

Autora:

Torre Carrillo, Ana Victoria

Asesor:

Guevara Bendezú, José Claudio
(ORCID: 0000-0003-0087-0965)

Jurado:

Tello Malpartida, Omar
Defilippi Shinzato, Teresa
Romero Rios, David

Lima - Perú

2023

Reporte de Análisis de Similitud

Archivo:

[1A TORRE CARRILLO ANA VICTORIA DOCTORADO 2023.docx](#)

Fecha del Análisis:

10/04/2023

Analizado por:

Astete Llerena, Johnny Tomas

Correo del analista:

jastete@unfv.edu.pe

Porcentaje:

3 %

Título:

DETERMINACIÓN DE LA PERMEABILIDAD DEL CONCRETO CONTROLADA POR LAS ADICIONES ULTRAFINAS

Enlace:

<https://secure.arkund.com/old/view/156468020-448564-431784#DcRBCsJAEDRu8z6l0kmzSS9inQhRaULu+ISvLvDg/dtn6utd0HR2dzQjjgaaGGYPOObZggQ0s6fQFxxV3ohPzQSRDGCzIjicXMshBFRrRuN9Hq9jf5z7s61yExviUSVdqjK7xu8P>



DRA. MIRIAM LILIANA FLORES CORONADO
JEFA DE GRADOS Y GESTIÓN DEL EGRESADO



ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSGRADO

**DETERMINACIÓN DE LA PERMEABILIDAD DEL CONCRETO CONTROLADA
POR LAS ADICIONES ULTRAFINAS**

Línea de investigación:

Polímeros naturales, sintéticos y funcionales

Tesis para optar el grado académico de Doctora en Ingeniería Civil

Autor:

Torre Carrillo, Ana Victoria

Asesor:

Guevara Bendezú, José Claudio

(ORCID: 0000-0003-0087-0965)

Jurado:

Tello Malpartida, Omar

Defilippi Shinzato, Teresa

Romero Rios, David

LIMA – PERÚ

2023

DEDICATORIA

Dedicado a mis padres Juan y Nelly

A.V.T.C.

AGRADECIMIENTOS

Gratifico a Dios por guiar mis pasos y hacer posible el logro de este objetivo; a mi familia por el apoyo y confianza durante todo este tiempo; a los docentes de la Escuela de Posgrado de la UNFV, que contribuyeron con sus aportes y conocimientos.

ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN	16
1.1	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
1.2	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	16
1.3	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	18
□	<i>Problema general</i>	18
□	<i>Problemas específicos</i>	18
1.4	ANTECEDENTES	18
□	<i>Antecedentes Internacionales</i>	18
□	<i>Antecedentes Nacionales</i>	23
1.5	JUSTIFICACIÓN DE INVESTIGACIÓN.....	24
1.6	LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN	28
1.7	OBJETIVOS.....	29
□	<i>Objetivo General</i>	29
□	<i>Objetivos específicos</i>	29
1.8	HIPÓTESIS.....	29
II.	MARCO TEÓRICO	30
2.1.	MARCO CONCEPTUAL.....	30
III.	MÉTODO	45
3.1.	TIPO DE INVESTIGACIÓN	45
3.2.	POBLACIÓN Y MUESTRA.....	48
3.3.	OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES	50
3.4.	INSTRUMENTOS.....	53
3.5.	PROCEDIMIENTOS.....	54
3.6.	ANÁLISIS DE DATOS.....	54
IV.	RESULTADOS.....	73
V.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	89
VI.	CONCLUSIONES.....	184

VII. RECOMENDACIONES	188
VIII. REFERENCIAS	189
IX. ANEXOS	1
ANEXO A.....	1
ANEXO B.....	4
ANEXO C.....	5
ANEXO D.....	6
ANEXO E.....	7
ANEXO F.....	8
ANEXO G.....	9
ANEXO H.....	10
ANEXO I.....	11
ANEXO J.....	12
ANEXO K.....	13
ANEXO L.....	14
ANEXO M.....	15

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1	18
TABLA 2	23
TABLA 3	33
TABLA 4	33
TABLA 5	40
TABLA 6	40
TABLA 7	46
TABLA 8	49
TABLA 9	50
TABLA 10	53
TABLA 11	59
TABLA 12	59
TABLA 13	60
TABLA 14	60
TABLA 15	62
TABLA 16	62
TABLA 17	63
TABLA 18	63
TABLA 19	65
TABLA 20	66
TABLA 21	66
TABLA 22	67

TABLA 23	69
TABLA 24	70
TABLA 25	70
TABLA 26	73
TABLA 27	74
TABLA 28	74
TABLA 29	75
TABLA 30	75
TABLA 31	76
TABLA 32	76
TABLA 33	77
TABLA 34	77
TABLA 35	78
TABLA 36	79
TABLA 37	80
TABLA 38	81
TABLA 39	81
TABLA 40	82
TABLA 41	83
TABLA 42	84
TABLA 43	85
TABLA 44	86
TABLA 45	87

TABLA 46	88
TABLA 47	89
TABLA 48	92
TABLA 49	92
TABLA 50	93
TABLA 51	93
TABLA 52	94
TABLA 53	94
TABLA 54	96
TABLA 55	96
TABLA 56	96
TABLA 57	98
TABLA 58	99
TABLA 59	101
TABLA 60	102
TABLA 61	102
TABLA 62	103
TABLA 63	103
TABLA 64	104
TABLA 65	105
TABLA 66	105
TABLA 67	106
TABLA 68	108

TABLA 69	113
TABLA 70	116
TABLA 71	116
TABLA 72.....	117
TABLA 73	117
TABLA 74	118
TABLA 75	118
TABLA 76	120
TABLA 77	120
TABLA 78	120
TABLA 79	121
TABLA 80	121
TABLA 81	122
TABLA 82	124
TABLA 83	130
TABLA 84	134
TABLA 85	134
TABLA 86	136
TABLA 87	136
TABLA 88	136
TABLA 89	137
TABLA 90	137
TABLA 91	137

TABLA 92	138
TABLA 93	138
TABLA 94	139
TABLA 95	144
TABLA 96	146
TABLA 97	147
<i>TABLA 98</i>	148
TABLA 99	179
<i>TABLA 100</i>	180
TABLA 101	182
TABLA 102	182
<i>TABLA 103</i>	183
TABLA 104	184

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1	31
FIGURA 2	37
FIGURA 3	42
FIGURA 4	55
FIGURA 5	55
FIGURA 6	61
FIGURA 7	62
FIGURA 8	67
FIGURA 9	68
FIGURA 10	71
FIGURA 11	71
FIGURA 12	92
FIGURA 13	94
FIGURA 14	95
FIGURA 15	97
FIGURA 16	98
FIGURA 17	102
FIGURA 18	103
FIGURA 19	104
FIGURA 20	106
FIGURA 21	108
FIGURA 22	109

FIGURA 23	110
FIGURA 24	110
FIGURA 25	111
FIGURA 26	112
FIGURA 27	117
FIGURA 28	118
FIGURA 29	119
FIGURA 30	123
FIGURA 31	125
FIGURA 32	125
FIGURA 33	126
FIGURA 34	127
FIGURA 35	127
FIGURA 36	128
FIGURA 37	128
FIGURA 38	129
FIGURA 39	129
FIGURA 40	135
FIGURA 41	138
FIGURA 42	140
FIGURA 43	140
FIGURA 44	141
FIGURA 45	141

FIGURA 46	142
FIGURA 47	142
FIGURA 48	144
FIGURA 49	145
FIGURA 50	149
FIGURA 51	149
FIGURA 52	150
FIGURA 53	150
FIGURA 54	151
FIGURA 55	151
FIGURA 56	152
FIGURA 57	153
FIGURA 58	153
FIGURA 59	154
FIGURA 60	154
FIGURA 61	155
FIGURA 62	156
FIGURA 63	156
FIGURA 64	156
FIGURA 65	157
FIGURA 66	157
FIGURA 67	158
FIGURA 68	158

FIGURA 69 159

FIGURA 70 160

FIGURA 71 160

FIGURA 72 160

FIGURA 73 161

FIGURA 74 162

FIGURA 75 162

FIGURA 76 163

FIGURA 77 163

FIGURA 78 164

FIGURA 79 164

FIGURA 80 165

FIGURA 81 165

FIGURA 82 166

FIGURA 83 166

FIGURA 84 167

FIGURA 85 168

FIGURA 86 168

FIGURA 87 169

FIGURA 88 169

FIGURA 89 170

FIGURA 90 170

FIGURA 91 171

FIGURA 92	172
FIGURA 93	172
FIGURA 94	173
FIGURA 95	173
FIGURA 96	174
FIGURA 97	174
FIGURA 98	175
FIGURA 99	175
FIGURA 100.....	176
FIGURA 101.....	176
FIGURA 102.....	177
FIGURA 103.....	177
FIGURA 104.....	178
FIGURA 105.....	179
FIGURA 106.....	7
FIGURA 107.....	15

RESUMEN

El objetivo de la presente investigación fue determinar el coeficiente de permeabilidad del concreto controlado por tres adiciones minerales ultrafinas (Microsílice, Metacaolín y puzolana). En la parte experimental se elaboraron mezclas de concreto con relaciones agua/cemento de 0.40, 0.45, 0.50 y 0.55 y diferentes porcentajes de las adiciones mencionadas. Se fabricaron 457 muestras cilíndricas a las cuales se les midió el coeficiente de permeabilidad, el contenido de vacíos y la profundidad de humedecimiento. Para el análisis y validación de los resultados, se utilizaron seis estructuras de redes neuronales artificiales con 16 variables de entrada, para el pronóstico del coeficiente de permeabilidad; se aplicó la técnica de regresión múltiple lineal para establecer ecuaciones de correlación entre las variables de fabricación y la permeabilidad, obteniéndose correlaciones mayores al 80% en todos los casos. Del análisis de los resultados obtenidos se concluyó que en todos los casos los concretos con adiciones disminuyeron el coeficiente de permeabilidad, además el uso de las redes neuronales artificiales permitió identificar la estructura de red, para el pronóstico de los valores de permeabilidad con un coeficiente de correlación de 0.907. Mediante el análisis de regresión múltiple lineal se establecieron ecuaciones para determinar la permeabilidad con correlaciones de hasta 88%. Finalmente, se propuso un factor denominado índice de durabilidad, calculado con los datos de permeabilidad promedio, (obtenidos en el concreto con y sin adición) para la evaluación cualitativa del concreto con adición mineral ultrafina, expuesto a humedad.

Palabras clave: permeabilidad, porosidad, Microsílice, Metacaolín, puzolana, adiciones.

ABSTRACT

The objective of the present investigation was to determine the coefficient of concrete permeability, controlled by three ultrafine mineral additions (microsilica, metakaolin and pozzolan). In the experimental part, concrete mixtures were prepared with water/cement ratios of 0.40, 0.45, 0.50 and 0.55 and with different concentrations of the additions. 457 cylindrical samples were prepared, and its permeability coefficient, voids content, and wetting depth were measured. For the analysis and validation of the results the following were used: six artificial neural networks structures with 16 input variables for the prediction of the permeability coefficient; multiple linear regression was applied to determine the correlation equations between manufacturing variables and permeability, obtaining correlations greater than 80% in all cases. It was concluded that in all cases, the concrete with additions decreased the coefficient of permeability; the use of artificial neural networks allowed to identify the network structure to forecast the permeability values with a correlation coefficient of 0.907. Using multiple linear regression analysis, equations were established to determine the permeability with correlations up to 88%. Finally, a factor called durability index is proposed, which is calculated with the average permeability data (obtained from concrete with and without addition) and can be used for qualitative evaluation of concrete with ultrafine mineral additions exposed to humidity.

Key words: Transport properties, permeability coefficient, microsilica, metakaolin and pozzolan

RESUMO

Objetivo da presente investigação foi determinar o coeficiente de permeabilidade do concreto controlado por três adições minerais ultrafinas (microsílica, metacaulim e pozolana). Na parte experimental, foram preparadas misturas de concreto com relações água/cimento de 0,40, 0,45, 0,50 e 0,55 e diferentes porcentagens das adições citadas, foram fabricadas 457 amostras cilíndricas, às quais foram avaliadas o coeficiente de permeabilidade, o teor de vazios e a profundidade de molhagem. Para a análise e validação dos resultados, foram utilizados: Seis estruturas de redes neurais artificiais com 16 variáveis de entrada, para a previsão do coeficiente de permeabilidade a técnica de regressão linear múltipla foi aplicada para estabelecer equações de correlação entre variáveis de fabricação e permeabilidade, obtendo correlações superiores a 80% em todos os casos. Da análise dos resultados obtidos, conclui-se que em todos os casos, o concreto com adições diminuiu o coeficiente de permeabilidade; e o uso de redes neurais artificiais permitiu identificar a estrutura da rede para a previsão de valores de permeabilidade com um coeficiente de correlação de 0,907. Usando análise de regressão linear múltipla, foram estabelecidas equações para determinar a permeabilidade com correlações de até 88%; por fim, é proposto um fator denominado índice de durabilidade, calculado com os dados de permeabilidade média, (obtidos no concreto com e sem adição); Para avaliação qualitativa de concretos com adição mineral ultrafina, expostos à umidade.

Palavras-chave: Propriedades de transporte, coeficiente de permeabilidade, microsílica, metacaulim e pozolana.

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del Problema

La mayor causa de muchos procesos de degradación del concreto, están asociadas al transporte de fluidos a través de su estructura porosa y permeabilidad, ambos son considerados factores claves de durabilidad; la gran extensión de nuestro litoral peruano es de aproximadamente 3000km; y se cuentan con muchas obras portuarias y centros urbanos prioritariamente de concreto, además de otras estructuras que estarán en contacto con agua (canales, represas, reservorios etc.); razón por la cual, es importante diseñar concretos de baja permeabilidad; mediante el uso adecuado de adiciones minerales ultrafinas, es posible controlar la permeabilidad del concreto; esta técnica aún no está muy difundida en nuestro medio; siendo además las adiciones ultrafinas muy ricas en sílice pueden causar un efecto de densificación de la microestructura del concreto, debido a las reacciones puzolánicas con la cal libre del concreto que permiten la formación de nuevos productos de hidratación, reduciendo de esta manera el tamaño de los poros y consecuentemente la permeabilidad; actualmente los reglamentos peruanos no especifican criterios que aseguren grados de impermeabilidad y consecuentemente la durabilidad del concreto; solo existen recomendaciones respecto a la relación agua-cemento y cantidades mínimas de 356 kg de cemento por metro cúbico. Por lo mencionado anteriormente, en concretos expuestos a condiciones de humedad durante su vida útil, el coeficiente de permeabilidad es un parámetro importante para evaluar y pronosticar a fin de asegurar la durabilidad de las estructuras y considerarlo en la etapa del diseño.

1.2 Descripción del Problema

Siendo el concreto el material más utilizado en la construcción, y muy al contrario de lo que se supone, este material tiene una microestructura porosa por lo que es propenso a la permeabilidad al agua, se debe prestar especial cuidado en estructuras que estarán expuestas a

la humedad o en contacto con el agua, tales como: reservorios, canales, represas, estructuras portuarias, etc.

Según Neville (2013), todas las fallas por durabilidad y las causas de muchos procesos de degradación en el concreto se deben al transporte de fluidos a través del concreto. El ingreso de muchas sustancias dañinas para el concreto, tales como cloruros, sulfatos, CO₂, además de la exposición a líquidos y gases naturales o industriales; es controlado principalmente por la permeabilidad del concreto.

Actualmente los reglamentos nacionales no especifican criterios de permeabilidad, solo existen recomendaciones de cómo controlar la relación agua-cemento y recomendaciones respecto a cantidades mínimas de cemento por metro cúbico.

En cuanto al tipo de cementante a utilizar, en nuestro País, no es común el uso de las adiciones minerales ultrafinas, estas adiciones minerales son muy finas y cuentan con altas superficies específicas, que mejoran no solo las resistencias mecánicas del concreto (a largo plazo) sino también contribuyen en la disminución de la permeabilidad.

Asimismo, la metodología de ensayo para determinar la permeabilidad no es muy accesible, y su proceso demanda 56 días de medición; en el Perú solo dos instituciones disponen de este equipo (UNI-PUCP). Por todo ello se considera importante contar con valores referenciales o con técnicas de predicción para su consideración durante el diseño sobre todo en aquellos concretos que estarán en contacto con la humedad durante su vida útil, para diseñarlos con baja permeabilidad a fin de evitar diversas patologías asociadas a la humedad como por ejemplo la corrosión, la carbonatación y consecuente fisuraciones, pérdida de durabilidad y evitar grandes costos de reparación. Por ello es importante para el ingeniero civil que cuente con valores referenciales del coeficiente de permeabilidad que permitirían controlar el paso del agua en el interior de las estructuras, y así mejorar la durabilidad de las estructuras.

1.3 Formulación del Problema

– Problema general

¿De qué manera las adiciones minerales ultrafinas controlan la permeabilidad del concreto?

– Problemas específicos

¿De qué manera la incorporación de Microsílice en el concreto controla la permeabilidad del concreto?

¿De qué manera la incorporación de Metacaolín en el concreto controla la permeabilidad del concreto?

¿De qué manera la incorporación de puzolana en el concreto controla la permeabilidad del concreto?

1.4 Antecedentes

– Antecedentes Internacionales

Tabla 1

Antecedentes

Referencia	Variabes principales	Resultados	Conclusión
Amir et al (2022). Evaluation of test procedures for durability and permeability assessment of concretes containing calcined clay	% Caolin Absorción capilar Resistividad Resistencia a compresión Permeabilidad	Según los resultados, prueba de absorción de agua basada en BS 1881-122 no pudo especificar con precisión las propiedades de permeabilidad de las mezclas binarias y LC3. La tasa inicial de absorción de agua capilar tuvo una correlación adecuada con los resultados de métodos de prueba de penetración de agua y resistividad eléctrica	<ul style="list-style-type: none"> • Concretos con arcillas calcinadas de bajo grado, tenían menores resistencias y, mayores permeabilidades; durabilidad inferior contra la penetración de iones de cloruro después de 360 días de curado, las resistencias a la compresión del concreto con arcilla calcinada fueron entre un 9% y un 28,7% más bajas que las muestras de control.

<p>Multon et al. (2022). Non-destructive measurements for the evaluation of the air permeability of concrete structures, Measurement</p>	<p>Técnicas de Permeabilidad: Permeabilidad al aire Permeabilidad al agua Resistividad eléctrica</p>	<p>Se evaluó la permeabilidad usando muestras diamantinas de seis losas antes de la carga termo-hídrica. Los resultados de la medición para las tres técnicas no destructivas y para la técnica de doble celda se observa que la saturación más baja fue de alrededor del 30%. Como las técnicas no consideraron la misma profundidad, este condicionamiento puede dar lugar a una dispersión diferente entre técnicas, pero también, con el grado de saturación global obtenido por medida de masa.</p>	<p>Las 3 técnicas coincidieron respecto a la heterogeneidad del concreto (la mayoría de las diferencias son menores). del 50%). La técnica de doble celda es apta para evaluar la permeabilidad en estado estacionario para elementos de gran tamaño. Así se ha demostrado que la presión aparente para una presión absoluta de 2 bares puede evaluarse a partir de la permeabilidad superficial medida en vacío.</p>
<p>Ahmad et al (2019). Influence of admixing natural pozzolan as partial replacement of cement and microsilica in UHPC mixtures</p>	<p>% de microsílíce, % de puzolana, permeabilidad al cloruro</p>	<p>Las mezclas con adiciones de microsílíce, % de puzolana, a 150 Coulombs, rango de permeabilidad muy baja e insignificante</p>	<p>La utilización de puzolana y micro sílice en la mezcla de reducen la permeabilidad al cloruro del concreto</p>
<p>Aire y Reyes (2019). Durable concrete specification development and implementation for the New International Airport of Mexico</p>	<p>Humo de sílice, permeabilidad, trabajabilidad, resistividad eléctrica, resistencia a sulfatos, penetración al ion cloruro</p>	<p>Desarrollaron especificaciones técnicas, requisitos de durabilidad para concretos expuestos a cloruros, sulfatos. Parámetros de control: baja permeabilidad al agua, densidad del humo de sílice, trabajabilidad, resistividad eléctrica y autoreparación de grietas</p>	<p>Baja permeabilidad, capacidad de autocuración y reducción de agrietamiento contribuyen a menguar el riesgo de fenómenos fisicoquímicos en el concreto.</p>
<p>Helene et al (2018) Evaluation of the chloride penetration and service life of self-healing concretes activated by crystalline catalyst</p>	<p>Catalizador cristalino, Escoria de alto horno, Permeabilidad al cloruro</p>	<p>Las mezclas con catalizador cristalino no cambiaron propiedades en estado fresco del concreto, reducen la penetración de cloruro, no afecta la resistencia a la compresión</p>	<p>La adición de catalizador cristalino, reducen la penetración de cloruros en el concreto endurecido y no afecta la resistencia</p>

Nas y Kurbetci (2018). Durability properties of concrete containing metakaolin	<p>% de reemplazo de Metacaolín, Resistencia a la compresión, Absorción capilar, Permeabilidad rápida al cloruro</p>	<p>En concretos adicionados con Metacaolín: Aumentó la resistencia a la compresión a 28 días; disminuyó el coeficiente de sortividad (0.08 y 0.018 cm/min^{0.5}); las mezclas con 20% de metacaolín, presentaron menores valores de permeabilidad (800 coulombs)</p>	<p>La adición de Metacaolín, disminuye el coeficiente de sortividad y la permeabilidad al cloruro en el concreto endurecido, aumenta resistencia a la compresión.</p>
Salih (2018) Strength and durability of high-performance concrete containing fly ash and micro silica	<p>Microsílice, cenizas volantes, absorción capilar, penetración de agua, permeabilidad rápida al cloruro</p>	<p>Poca mejora en la absorción del concreto; reducción en la permeabilidad; el menor valor 56 días; reducción de permeabilidad al cl⁻, su menor valor se obtuvo con 7% de microsíllice (180 Coulombs)</p>	<p>Mezclas con ceniza volante y microsíllice, presentan reducción en la permeabilidad al agua y la permeabilidad al cloruro del concreto endurecido</p>
Sadrmtomaz et al (2017). Effect of fly ash and silica fume on transition zone, pore structure and permeability of concrete	<p>Humo de sílice, ceniza volante, absorción capilar, penetración de agua, porosidad, permeabilidad rápida a cloruros</p>	<p>La mezcla con adición de 10% de humo de sílice presentó la menor penetración de agua a los 90 días (1 mm). se obtuvieron correlaciones de tendencia exponencial entre las propiedades de transporte del agua (coeficiente de sortividad, penetración de agua, porosidad total y permeabilidad rápida a cloruros) y la resistencia a la compresión</p>	<p>Las adiciones utilizadas disminuyeron las propiedades de transporte de agua en el concreto, siendo la mayor reducción en las mezclas con adición de 10% de humo de sílice a los 90 días (1 mm). Se obtuvieron buenas correlaciones entre las propiedades de transporte y la resistencia a la compresión</p>
Mohammadreza et al (2017). Influence of Permeability-Reducing Admixtures on Water	<p>Ceniza volante, escoria granulada de alto horno, vacíos permeables, profundidad de penetración de agua, resistencia a la compresión</p>	<p>Para relación a/c=0.4 y 0.6, materiales cementicio suplementarios (cemento portland , ceniza volante y escoria), se evidencia: Disminución en la profundidad de penetración de agua</p>	<p>La adición de ceniza volante y escoria de alto horno, disminuyen la profundidad de penetración de agua en el concreto endurecido</p>

Khotbehsara et al (2017). Durability Characteristics of Self-Compacting Concrete Incorporating Pumice and Metakaolin	Metacaolín, pumita, absorción, microestructura del concreto	En todas las mezclas adicionadas: aumento la resistencia a la compresión, disminuyo la absorción con respecto a la mezcla de referencia, presentan mayor densificación en la microestructura respecto a la mezcla de referencia, debido a las reacciones puzolánicas	Las mezclas con Metacaolín y pumita, presentan aumento en la resistencia a la compresión y disminución en la absorción del concreto endurecido. También se evidencia un refinamiento en la microestructura del concreto
Ahari et al (2015). Permeability properties of self-consolidating concrete containing various supplementary cementitious materials	Cenizas volantes de clase F., cenizas volantes de clase C., humo de sílice, metacaolín, escoria granulada de alto horno. Permeabilidad rápida a cloruros, profundidad de penetración de agua, absorción de agua, sortividad	Profundidad penetración de agua a los 28 y 90 días (5 a 15 mm en todas las mezclas adicionadas); aumentó resistencia a la compresión; disminución de la permeabilidad a los cloruros a los 90 días (obteniéndose valores entre 200 y 2000 Coulombs); disminución de la absorción y vacíos menores a 2% y 4.5 %	Las mezclas elaboradas a partir de Cenizas volantes, humo de sílice, Metacaolín y escoria, disminuyen la permeabilidad rápida a cloruros, profundidad de penetración de agua, absorción y vacíos permeables del concreto endurecido
Ramezaninpour y Jovein (2012). Influence of metakaolin as cementing material on strength and durability of concretes	Metacaolín, Resistencia a la compresión, penetración de agua, sortividad, resistividad eléctrica	El coeficiente de sortividad, a 180 días, varía entre $5.67 - 7.29 \times 10^{-6}$ m/s $2.18 - 3.97 \times 10^{-6}$ m/s y $2.07 - 3.21 \times 10^{-6}$ m/s, para a/c de 0.5, 0.4 y 0.35. La penetración de agua, a la edad de 180 días, varía entre 4 – 6.7 mm, 3.9 – 4.2 mm y 2.2 – 2.9 mm para mezclas adicionadas con a/c de 0.5, 0.4 y 0.35	La adición de Metacaolín mejoro las propiedades analizadas en todas las edades, notándose una tendencia de mejora al aumentar el contenido de Metacaolín en la mezcla

<p>Najimi et al (2012). An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan</p>	<p>Zeolita, Penetración de agua, Permeabilidad rápida a cloruro</p>	<p>Mezclas de concreto con 15 y 30 % de zeolita: Reducción de la penetración de agua y permeabilidad rápida a cloruros; el menor valor de penetración de agua con 30% de reemplazo de zeolita (10 mm a los 90 días)</p>	<p>El uso de zeolita como suplemento del concreto disminuye la penetración de agua, permeabilidad rápida a cloruros, obteniéndose los mejores resultados con 30% de zeolita</p>
<p>Lizarazu y López (2012). Effect of silica fume addition on the chloride-related transport properties of high-performance concrete</p>	<p>Humo de sílice, Permeabilidad rápida a cloruro</p>	<p>La permeabilidad a los cloruros disminuye con respecto a las mezclas de referencia; el menor valor de permeabilidad fue de 100 coulomb y se obtuvo con 15% de humo de sílice encontrándose dentro del rango de valor muy bajo, según ASTM C1202</p>	<p>La adición de humo de sílice en las mezclas de concreto, disminuyeron la permeabilidad rápida a los cloruros en el concreto endurecido</p>
<p>Güneyisi et al (2011). Permeation properties of Self-Consolidating Concretes with Mineral Admixtures</p>	<p>Ceniza volante, Metacaolín, Escoria granulada de alto horno, Sortividad, Permeabilidad al cloruro, Permeabilidad al agua</p>	<p>De las 22 mezclas binarias, ternarias y cuaternarias, elaboradas variando el tipo y cantidad de adición mineral se evidencia: Las mezclas binarias con metacaolín (5, 10 y 15 %) alta reducción de la permeabilidad</p>	<p>Las propiedades de transporte de agua indicadas están muy ligadas al tipo y cantidad de adición mineral en la mezcla de concreto, asimismo se concluye que en las mezclas binarias con metacaolín es más significativa la reducción de la permeabilidad</p>
<p>Valderrama et al (2011). Características de desempeño de un concreto adicionado con cenizas volantes de alto nivel</p>	<p>Cenizas volantes clase F., Permeabilidad a los cloruros</p>	<p>% óptimo de adición de cenizas volantes es 10%, % mayores al 10 %, dan efectos positivos en la permeabilidad a cloruros</p>	<p>La adición de cenizas volantes, mayores al 10%, en las mezclas disminuyen la permeabilidad a los cloruros del concreto endurecido</p>

Torres et al (2011). Efecto del porcentaje de adición de metacaolín en las propiedades finales del concreto adicionado	Metacaolín, Humo de sílice, Permeabilidad a cloruros, Resistencia a la compresión	Propiedades mecánicas aumentan con adición de metacaolín, hasta 20%, y, la permeabilidad es menor al 80%, respecto a las muestras de control ; la resistencia compresión de los concretos adicionados con humo de sílice son mayores que con metacaolín; con metacaolín tuvieron mejor desempeño de permeabilidad a cloruros, en comparación con muestras humo de sílice	Las adiciones de metacaolín y humo de sílice en las mezclas de concreto, aumentan la resistencia a la compresión y disminuyen la permeabilidad al cloruro del concreto endurecido. Notándose mejor desempeño en la permeabilidad al cloruro, en las muestras con adición de metacaolín
Mejía et al (2009). Concreto adicionado con Metacaolín: Comportamiento a carbonatación y cloruros	Metacaolín, Permeabilidad al cloruro, Contenido de vacíos, Absorción	Mezclas de concreto con adición de metacaolín: Incrementa propiedades mecánicas; Valores de permeabilidad al cloruro menores al 1.0% a los 90 días; Contenido de vacíos menores al 4.6% a 90 días; disminuye la absorción; desempeño frente a la carbonatación mejora	La adición de Metacaolín, incrementa las propiedades mecánicas y disminuye la permeabilidad al cloruro, absorción y vacíos, en el concreto endurecido
Bermejo y Moragues (2008, del 18 al 19 de febrero). Permeabilidad de hormigones autocompactados	Cenizas volantes, Filler calizo, Porosidad, Profundidad de penetración	Características mecánicas de los concretos con ceniza volante son mejores que las mezclas con filler calizo. Mezclas con cenizas volantes disminución de la profundidad de penetración y porosidad, respecto al empleo de filler calizo	Las mezclas adicionadas con ceniza volante presentan mejor desempeño en las propiedades mecánicas, penetración de agua y porosidad, respecto a las muestras adicionadas con filler calizo

Nota: Elaboración propia

– Antecedentes Nacionales

De la búsqueda bibliográfica realizada se han encontrado los antecedentes nacionales que se presentan a continuación en la Tabla N.º 2.

Tabla 2

Antecedentes Nacionales

Referencia	Variables principales	Resultados	Conclusión
Siccha (2019). Facultad de Ingeniería Civil – Universidad Nacional de Ingeniería. Influencia de la adición del metacaolín en la permeabilidad del concreto de cemento Portland	Metacaolín (10% y 15%); agua /cemento; edad; permeabilidad al agua	La disminución de permeabilidad entre los 28 a 56 días es mayor en concretos con 10% de metacaolín (entre 0.92×10^{-13} y 0.78×10^{-12} m/s) que, en concretos con 15% de metacaolín (0.03×10^{-13} y 1.02×10^{-13} m/s)	El concreto adicionado con metacaolín es más impermeable que el concreto simple, disminuyendo la permeabilidad en más del 60%
Bustamante (2017) Facultad de Ingeniería Civil – Pontificia Universidad Católica del Perú. Estudio de la correlación entre la relación agua/cemento y la permeabilidad al agua de concretos usuales en Perú	agua / cemento; Edad; Permeabilidad del concreto	Obtuvo que coeficiente de permeabilidad (k) a los 28 días con curado húmedo es de 7.39×10^{-14} , 13.85×10^{-14} , 25.25×10^{-14} y 119.69×10^{-14} para concretos de relación agua/cemento de 0.45, 0.5, 0.6 y 0.7	La relación que existe entre el coeficiente de permeabilidad y la relación a/c es directa y varía de forma exponencial
Moreno (2017). Facultad de Ingeniería Civil – Universidad Nacional de Ingeniería. Implementación del método de presión para medir la permeabilidad en el concreto	agua / cemento; Edad	Indicó que la relación existente entre el coeficiente de permeabilidad y la relación agua /cemento es directo y exponencial	Para edades superiores a 49 días el coeficiente de permeabilidad se estabiliza, obteniendo valores de coeficiente de permeabilidad 2×10^{-11} , 4×10^{-12} y 2×10^{-12} para mezclas con relaciones agua/cemento de 0.65, 0.55 y 0.45, respectivamente

Nota: Elaboración propia

1.5 Justificación de Investigación

Fundamento

Siendo el paso del agua a través de la microestructura porosa del concreto uno de los principales problemas en las construcciones y considerando que el concreto no es un material completamente impermeable, se pueden generar deterioros prematuros debido a su facilidad de infiltración y/o a un incorrecto proceso de impermeabilización de los elementos de concreto; justamente los procesos de deterioro más importantes en el concreto están relacionados con la facilidad de ingreso de la humedad hacia el interior de las estructuras, presentándose fugas activas y trasmisión de humedad en condiciones de servicio; para lograr un concreto duradero, se requiere de bajos valores de permeabilidad, que eviten problemas de: corrosión, ataque por cloruros, ataque por sulfatos, reactividad álcali-sílice y otras reacciones adversas (Mohammadreza et al., 2017).

La presente investigación está fundamentada en que no se cuenta con valores referenciales del coeficiente de permeabilidad y que las adiciones minerales ultrafinas pueden controlar la permeabilidad del concreto.

Justificación teórica

El concepto de permeabilidad es poco utilizado o pasa desapercibido durante el diseño de estructuras de concreto, siendo el concreto un material expuesto a entornos agresivos, la presencia de poros capilares y otros poros de mayor tamaño, favorecen la permeabilidad y ejercen un efecto negativo en la durabilidad del concreto (Aire y Reyes, 2019).

La mejor forma de garantizar una buena durabilidad del concreto consiste en utilizar las materias primas adecuadas, una adecuada dosificación que asegure una elevada compacidad (baja relación a/c y elevado contenido de cemento) y una adecuada puesta en obra y curado (Aire y Reyes, 2019).

Además, Conociendo las condiciones de exposición se pueden tomar consideraciones para controlar algunos efectos negativos en el concreto; entre ellas el uso de adiciones.

En el entorno se pueden encontrar los agentes agresivos en disolución (sulfatos, cloruros, carbonatos), los cuales pueden ingresar a través de los poros y generar reacciones adversas con los hidróxidos de calcio libre presente en los poros del concreto, por ello, es importante controlar el paso de humedad (permeabilidad) al interior del concreto, mediante el uso de adiciones ultrafinas en cantidades adecuadas. Esto permitirá disminuir la permeabilidad por dos grandes motivos: Primero, la composición química de las adiciones (ricas en sílice) permitirá reacciones positivas en la microestructura donde la sílice de estas adiciones reaccionaran con la cal libre presente en los poros del concreto, disminuyendo estos vacíos y consecuentemente la permeabilidad, generando más silicato de calcio hidratado; Segundo las adiciones son materiales ultrafinas que ocuparan espacios que entre partículas de cemento han quedado libres; mejorando la compacidad y consecuentemente la permeabilidad y durabilidad del concreto. En esta investigación la permeabilidad fue medida como velocidad de ingreso del agua al concreto (coeficiente de permeabilidad al agua).

Justificación Práctica

La presente investigación contribuirá al control de los valores del coeficiente de permeabilidad como un valor escalar, el uso de una técnica normalizada de laboratorio permitirá establecer valores referenciales para su consideración durante el diseño de la mezcla fácil; y, además, el conocimiento del efecto de las adiciones ultrafinas en la permeabilidad permitirá a los diseñadores de concreto, su consideración con fines de mejorar la durabilidad del concreto.

Justificación Metodológica

La medición de la permeabilidad del concreto continúa siendo en cierta forma, una medida muy especializada. En los laboratorios de concreto el dispositivo para medir permeabilidad no es tan frecuente. Esto se debe principalmente a las pocas especificaciones que existen referentes a la permeabilidad al agua del concreto, la presente investigación

contribuye a determinar experimentalmente valores del coeficiente de permeabilidad del concreto, utilizando los minerales ultrafinos que existen en nuestro medio (microsílice, puzolana y Metacaolín) para diferentes relaciones agua-cemento (0.40 ,0.45, 0.50, 0.55 y 0.60).

Teniendo los datos experimentales, se utilizaron técnicas de redes neuronales que permitieron el pronóstico de la permeabilidad, así como la identificación de las variables de mayor incidencia en esta propiedad.

Las mezclas de concreto fueron hechas con las variables mencionadas anteriormente (tipo de minerales ultrafinos, cantidades de minerales ultrafinos, relaciones a/c y edades del concreto).

Justificación Social

Los aspectos que justifican el desarrollo de esta investigación se sustentan en la necesidad de construir estructuras más durables que no sean afectadas en los cortos plazos por la corrosión, carbonatación, ataque de sulfatos, todas ellas generadas como consecuencia de la alta permeabilidad del concreto (Barbudo y Borges, 2001).

Asimismo, recurrentemente se hacen evaluaciones y reparaciones a estructuras nuevas porque evidencian patologías asociadas a la permeabilidad (Barbudo y Borges, 2001). Esto conlleva a pagar costos innecesarios de reparaciones con el riesgo de que la estructura pierda durabilidad y con mayor razón considerando que el Perú tiene zona costera con alto grado de humedad (mayor al 90% en promedio) y altas concentraciones de nieblas salinas; por todo ello se evidencia la necesidad de especificar rangos de permeabilidad que ayuden a reducir estos riesgos en las estructuras, así como las variables que inciden.

Importancia de la investigación

La importancia de la investigación radica en mejorar la vida útil de las estructuras afectadas por la humedad, planteando además como alternativa el uso de adiciones minerales en cantidades adecuadas para disminuir la permeabilidad del concreto. Asimismo, establecer

rangos de permeabilidad del concreto, que puedan usarse para diseñar estructuras de concreto con baja permeabilidad, y que conociendo las variables de fabricación se puedan hacer estimaciones de esta propiedad.

1.6 Limitaciones de la Investigación

Espacial

La presente investigación se realizó en la ciudad de Lima en la Universidad Nacional Federico Villarreal y los datos experimentales fueron obtenidos en la Universidad Nacional de Ingeniería, en el laboratorio de Ensayos de materiales N°1; FIC-UNI, en Lima - Perú.

Temporal

Se han considerado 3 etapas:

- a. Recopilación Bibliográfica: Se inició en el mes de abril del 2019 y se concluyó en enero del 2021.
- b. Experimentación en laboratorio: Es la etapa más larga y tuvo una duración de 24 meses.
- c. Análisis de resultados: Esta es una fase transversal a la de experimentación, el análisis de los resultados tuvo una duración de 12 meses.

Social

Los actores involucrados en la utilización de los resultados de la investigación serán las siguientes instituciones:

- Ministerio de Vivienda y Construcción
- Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción (SENCICO)
- Cámara Peruana de la Construcción (CAPECO)
- Municipalidades
- Colegio de Ingenieros del Perú

- Colegio de Arquitectos del Perú
- Instituto nacional de calidad (INACAL)
- Comités técnicos de normalización
- Ingenieros y arquitectos
- Gobiernos regionales
- Municipalidades

1.7 Objetivos

- Objetivo General
 - Determinar la permeabilidad del concreto controlada por las adiciones minerales ultrafinas en la mezcla de concreto.
- Objetivos específicos
 - Aplicar Microsílice en la mezcla de concreto para controlar la permeabilidad.
 - Aplicar puzolana en la mezcla de concreto para controlar la permeabilidad.
 - Aplicar metacaolín en la mezcla de concreto para controlar la permeabilidad.

1.8 Hipótesis

Hipótesis principal

La adición de minerales ultrafinos en la mezcla de concreto controlará la permeabilidad.

Hipótesis secundarias

- La adición de Microsílice en la mezcla de concreto controlaría la permeabilidad.
- La adición de puzolana en la mezcla de concreto controlaría la permeabilidad.
- La adición de Metacaolín en la mezcla de concreto controlaría la permeabilidad.

II. MARCO TEÓRICO

2.1.Marco conceptual

Mecanismos de transporte

El ingreso del agua en el concreto puede darse a través de los espacios de poros en la pasta de cemento hidratada o micro fisuras presentes. Diferentes mecanismos físicos y/o químicos pueden generarse por el transporte del agua y sustancias químicas presentes, los factores que inciden son: la sustancia que fluye y su concentración, las condiciones ambientales, la estructura de los poros del concreto, el radio de los poros o el ancho de las microgrietas, el grado de saturación del sistema de poros y la temperatura (Kropp y Hilsdorf, 2015).

Los mecanismos de transporte que normalmente están asociados con la entrada de material perjudicial en el concreto son:

- Difusión
- Penetración
- Succión capilar
- Migración
- Permeabilidad

Porosidad

Los poros en el concreto se encuentran entretejidos y conectados, permitiendo así el paso lento del agua a través del concreto. Mientras más denso el concreto, más finos los poros y menos agua pueden pasar a través. El transporte de fluidos en el interior del concreto se debe a la estructura de la porosidad en el concreto. Los índices de la intrusión se relacionan con la permeabilidad del concreto. De la manera más general, la permeabilidad depende de la forma en que la porosidad total es distribuida. La porosidad, a su vez, se relaciona a la reacción

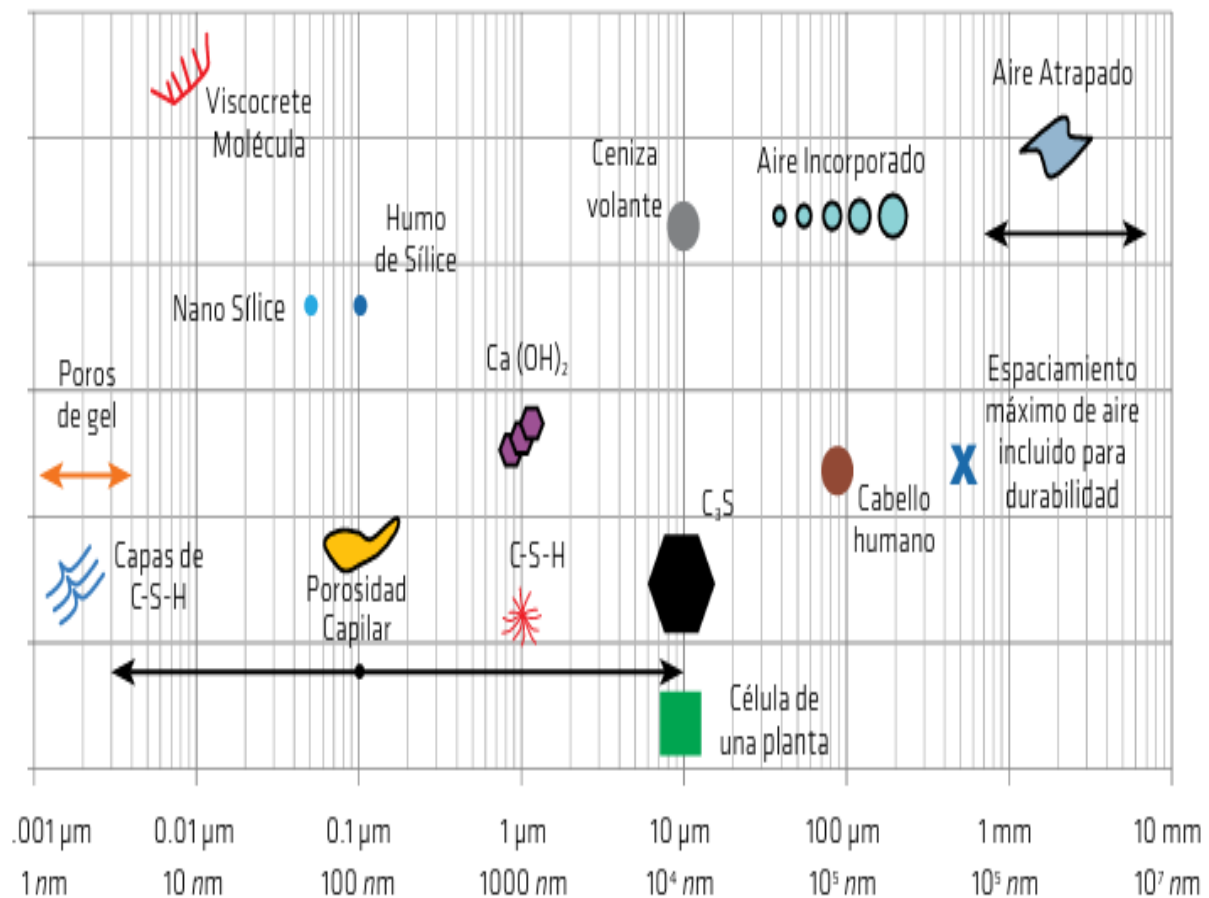
original del cemento, las mezclas minerales, y las partículas de agregados, la relación de agua-sólidos, y las condiciones de curado entre otras (López, 2004).

Tipos de poros del concreto.

Hay una variedad de poros en el concreto que pueden ser clasificados por su origen o por su efecto anticipado en los parámetros mensurables como la fuerza o permeabilidad (López J., 2004). Los tipos de poros en el concreto son: poros de gel de la pasta de cemento (asociados al proceso de hidratación del cemento no afectan la resistencia, están asociados a la contracción), poros capilares, poros de vacíos y discontinuidades asociadas con inestabilidades dimensionales durante el curado y porosidad del agregado.

Figura 1

Tipos de poros en el concreto



Nota: fuente (Metha, 2017)

Requisitos de Durabilidad en Normativas

Consideraciones del ACI 318S

En el caso que se requiera una baja permeabilidad por estar en contacto con el agua, el medio principal para obtener una baja permeabilidad es usando una relación a/c baja. Asimismo, clasifica y define los requisitos del concreto en contacto con el agua, según se menciona en la Tabla N° 3.

Consideraciones del comité ACI 350 “Código de Requerimientos para estructuras de concreto de ingeniería Ambiental”

Expone los métodos de diseño de estructuras de concreto reforzado para contener líquidos o gases, y las especificaciones que menciona (lo que debe aparecer en las memorias de diseño), en lo que se refiere al concreto solo debería mencionarse la resistencia a la compresión, la relación A/C y algunas características de composición. En la Tabla N. ° 4 se muestra un resumen de las especificaciones para concretos expuestos a condiciones de humedad, según las normativas revisadas.

Consideraciones de NTCH-2262

Indica realizar el ensayo después que las probetas cumplan 28 días de edad, y aplicar presión de agua de 0,1 MPa, durante 48 h, luego se aplican presiones de 0,3 MPa y 0,7 MPa durante 24 h cada una de ellas; estos ensayos en testigos diamantinos extraídos de paneles de muestreo del concreto en obra; recomendando que la penetración máxima de agua no debe ser mayor a 50 mm y adicionalmente, exige que hormigones y morteros impermeables tengan razones agua/cemento iguales o menores que 0,55.

Consideraciones de la NTC 4483

Esta norma establece que: “El concreto de baja permeabilidad es aquel que en el ensayo obtenga un coeficiente (K) menor a 10^{-12} m/s, con una profundidad de penetración de agua en la muestra ensayada menor a 30 mm”.

Tabla 3

Clasificación cualitativa de la permeabilidad

Determinación	Unidades	Permeabilidad		
		Baja	Media	Alta
Coeficiente de permeabilidad al agua	m/s	$<10^{-12}$	10^{-12} a 10^{-10}	$> 10^{-10}$
Profundidad de penetración	Mm	<30	30 a 60	>60

Nota: Elaboración propia.

Tabla 4

Resumen de especificaciones normativas revisadas

ACI 318		UNE-EN 206-1		
a/c	f'c	a/c	f'c	Min. cemento kg
0.4	350	0.45	350	360
0.45	315	0.5	300	320
0.5	280	0.55	280	300
0.55	250	0.6	250	280

Nota: Elaboración propia.

Bases filosóficas

El planeta tierra pertenece al sistema solar, se formó hace unos 4600 millones de años, en sus inicios era un lugar sin vida e inhóspito, Aristóteles creía que la tierra era estática y que el sol, la luna, los planetas y las estrellas se movían en órbitas alrededor de ella. El origen de la vida siempre ha preocupado el pensamiento humano; idealistas afirman que existe un ser supremo, el cristianismo de la antigüedad se basaba en la Biblia, la cual a su vez había copiado de las leyendas religiosas de Egipto y Babilonia no se practicaba la observación ni la experiencia, sino que se recurría a la Biblia y a las escrituras teológicas, hasta hoy día se cree

que los seres vivos han surgido y surgen de pronto y enteramente constituidos por generación espontánea, a consecuencia de un hecho creador del ser divino y sin ninguna relación con el desarrollo o evolución de la materia (Oparin, 1923).

Mientras que la ciencia constituye el fundamento de la tecnología, la ciencia es útil en la medida en que se la emplea en la realización de concepciones del mundo que concuerdan con los hechos, algunos aplican la investigación analítica de la naturaleza viva, sobre la base del estudio objetivo, de la experiencia (Oparin, 1923).

Oparin (1923), menciona que Aristóteles consideraba que los seres vivos, al igual que todos los demás objetos concretos, se formaban mediante la conjugación de determinado principio pasivo: la materia, con un principio activo: la forma. Esta última sería para los seres vivos la “entelequia del cuerpo”, es decir, el alma. Ella era la que daba forma al cuerpo y la que lo movía. Los hidrocarburos y sus derivados más inmediatos" se forman en los cuerpos celestes que nos rodean sin ninguna relación con la vida; es decir, en condiciones tales, que se excluye por completo la idea de vida en ellos. También en nuestro planeta esas sustancias se formaron al principio a consecuencia de las reacciones que se produjeron entre las sustancias inorgánicas, mucho antes de la aparición de vida. Naturalmente que el átomo de carbono de la atmósfera estelar no era todavía una sustancia orgánica, pero su extraordinaria facilidad para combinarse con el hidrógeno, el oxígeno y el nitrógeno llevaba implícita la posibilidad, en determinadas condiciones de existencia, de poder formar sustancias orgánicas a estructura de los seres vivos se iba perfeccionando y se adaptaba más y más a las condiciones en que se desarrollaba la vida. La organización de los seres vivos iba siendo cada vez mayor. Al comienzo, sólo se alimentaban de sustancias orgánicas. Pero al pasar del tiempo, esas sustancias fueron escaseando tanto que a los organismos primitivos no les quedó más recurso que sucumbir o desarrollar, en el proceso evolutivo, la propiedad de formar de alguna manera sustancias orgánicas con base en los materiales proporcionados por la naturaleza inorgánica,

con base en el anhídrido carbónico y el agua. Algunos seres vivos lo lograron, en efecto. Hace un millón de años, en el límite de los períodos terciario y cuaternario (último período, que dura hasta hoy día) aparecieron en la Tierra los pitecántropos, monos hombres que forman el eslabón intermedio entre el mono y el hombre. Los pitecántropos ya sabían hacer uso de los instrumentos de trabajo más sencillos. Estos monos hombres desaparecieron. Sus sucesores fueron nuestros antepasados. Durante el cuaternario, en los duros tiempos del último período glacial, en el siglo del mamut y del reno boreal, ya vivía en la Tierra hombres auténticos, que por la constitución de su cuerpo eran iguales a los actuales.

A través del tiempo las civilizaciones adolecieron de problemas por falta de desarrollar la capacidad de adaptarse y de auto renovarse creativamente para un nuevo mundo, donde las personas ansían viviendas seguras y durables es necesario aplicar la inteligencia el trabajo participativo y generar la capacidad de adaptarse. En este nuevo mundo, no existen más espacios para desperdicios, pérdidas, destrucción ambiental o social (Flores y Mosquera, 2013).

En realidad, hoy más que nunca precisamos de la capacidad nunca antes tan necesaria de ver las cosas de manera diferente, y de concebirlas a través de esa nueva perspectiva. En una investigación siempre existe el anhelo de lograr cambios profundos y honestos, en búsqueda de un mundo mejor, ocasionar que las cosas sean diferentes en nuestras ciudades, y nuestras comunidades.

El hombre según su naturaleza interactúa para vivir con objetos naturales, tiene necesidades relacionadas con lo material, transforma la naturaleza sometiéndola a sus propias necesidades animales y espirituales, así como a sus sueños: crea así el mundo de las tecnologías y el mundo de la cultura. La sociedad actual utiliza el concreto como principal material de construcción este material presentan fisuras que se originan en condiciones naturales y diversas, presentan gran variedad en cuanto a su origen, forma y extensión. Asimismo, la

acción combinada de agentes externos y la humedad también pueden producir estas fisuras y paso de humedad a través de las superficies fisuradas (Flores y Mosquera, 2013).

Barbudo y Borges (2001) detallan que el concepto de durabilidad es uno de los conceptos fundamentales en la construcción, es preciso mencionar que es un tema complejo de manejar ya que intervienen varios factores para el análisis, esto significa que cada análisis tendrá una concepción diferente, aunque este se encuentre orientado a un mismo fin. El analizar la durabilidad de las estructuras se relaciona con la vida útil de las estructuras y por ende la seguridad del ser humano.

La durabilidad de las estructuras influye en el desarrollo social, en la totalidad de las personas y consecuentemente existirá una correlación entre los fenómenos de crecimiento demográfico, crecimiento urbano e incremento en la demanda de estructuras de concreto para cobertura de servicios públicos y obras de infraestructura, lo que a su vez implicaría mayor cuidado en el diseño y aseguramiento de la impermeabilidad de estructuras en contacto con humedad para asegurar el tiempo de vida útil requerido (Barbudo y Borges, 2001).

El marco filosófico de la presente investigación está dentro del paradigma neopositivista, ya que predominan los métodos cuantitativos, por la aplicación de leyes y principios ya establecidos pre-estructurados e inmutables, además está sujeto a la verificación, confirmación, y análisis de resultados.

Bases tecnológicas

Equipos

a. Equipo de resistencia a la compresión.

Estos deben cumplir los requisitos del ASTM C39 / NTP 339.034.

El equipo utilizado para el ensayo de resistencia a la compresión fue la máquina de ensayo uniaxial de la marca Toni Technik, la cual tiene un rango de aplicación de carga de

hasta 3000 KN, consta de una pantalla de lectura de carga con resolución de 1 KN. El equipo de ensayo uniaxial puede operar con la velocidad de ensayo que estipula la NTP 339.034 igual a 0.25 MPa/s y además cuenta con certificado de calibración actualizado. Las probetas cilíndricas de ensayo se colocan dentro de un contenedor del equipo para evitar que la muestra de concreto se desprenda fuera del área de ensayo durante la rotura del espécimen.

Además, el equipo consta del software “Test Expert” que registra el desplazamiento y la carga durante todo el ensayo y por medio de un procesador plotea, en una pantalla, la gráfica carga-deformación en tiempo real.

b. Equipo para determinación de la permeabilidad al agua.

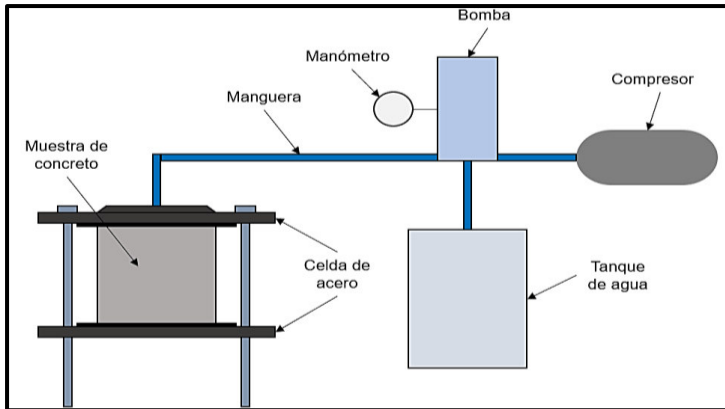
El equipo funciona con un compresor de aire de forma anexa. Este compresor de aire se activa y comienza a aplicar presión en el equipo. El compresor le da presión de aire en cada una de las cámaras de control de los bancos y el agua que se encuentra en su interior es desplazada hacia el espécimen de muestra. De esta manera el espécimen es sometido a presión que se gradúa en el manómetro.

El presostato instalado en el equipo tiene la función de apagar la bomba cuando la presión en el sistema alcance 0.5 Mpa y luego vuelve a encender la bomba cuando se haya registrado una pérdida de presión en el sistema de 0.05 Mpa, es decir que la presión del trabajo descienda a 0.45 Mpa, de esta manera se asegura que durante el ensayo las muestras sean ensayadas a la presión que recomienda la norma 0.5 \pm 0.05 MPa.

En la figura 2 se muestra el esquema de funcionamiento del equipo utilizado.

Figura 2

Esquema del equipo de permeabilidad



Nota: Elaboración propia.

Cámara de curado.

La cámara de curado mantiene a las muestras de concreto a una temperatura de 20 ± 2 °C y a una humedad relativa de 95 %, según recomienda la normativa ASTM C31. Así mismo la cámara de curado húmedo consta de estantes para poder colocar las muestras de concreto durante todo el tiempo de curado, en esta investigación se curaron muestras hasta 56 días.

Actividades y personal

- Preparación y acondicionamiento de las 457 muestras.
- Apoyo de dos técnicos laboratoristas, bajo la supervisión de la investigadora.
- Ejecución de los ensayos.
- Ensayos de laboratorio.
- Procesamiento y análisis de los datos.

Marco conceptual

Absorción capilar: La penetración de agua al interior del concreto basado en la propiedad de la absorción capilar se considera como el mecanismo más frecuente de transporte de agua en las estructuras de concreto armado.

Permeabilidad: La permeabilidad al agua es un fenómeno por el cual se produce el movimiento del agua a través del concreto, como consecuencia de una presión exterior, que se

genera, la mayoría de las veces por la altura del nivel del agua sobre el punto considerado. Aquí, si la red de capilares del concreto es muy fina, debido a diámetros muy pequeños de los capilares, el caudal de circulación resulta despreciable (INCONTEC, 2020).

Puzolana: La puzolana es un material natural o artificial que contiene sílice activa. La norma ASTM 618-20 A, describe la puzolana como un material silíceo o silíceo y aluminoso el cual, en sí mismo, posee poco o ningún valor cementante; pero, finamente dividida y en la presencia de humedad, reaccionará químicamente con hidróxido de calcio a temperaturas ordinarias para formar compuestos que poseen propiedades cementantes. Es esencial que esté en un estado finamente dividido pues es solamente entonces que la sílice se puede combinar con hidróxido de calcio (producido por el cemento portland que se hidrata) en presencia del agua para formar silicatos de calcio estables, los cuales tienen propiedades cementantes (Neville, 2013).

Metacaolín: El metacaolín, es un mineral puzolánico artificial silicoaluminoso que se obtiene mediante la calcinación a 650-800 °C de una arcilla llamada caolín mucho más fino que el cemento y con elevada actividad puzolánica.

Durabilidad: La durabilidad del concreto de cemento portland se refiere a la capacidad de este para resistir los ataques químicos o biológicos, la abrasión u otra acción que cause daño en el tiempo; es decir, que el concreto durable mantenga su forma original, su calidad y su servicio cuando sea expuesto al medio ambiente. Norma E.060: Concreto Armado en el Artículo 4.1.1, establece que las relaciones agua-material cementante se calculan usando el peso del cemento, más el peso de las cenizas volantes y otras puzolanas que cumplan con la NTP 334.104, el peso de la escoria que cumpla con la Norma ASTM C 989 y la Microsílice que cumpla con la NTP 334.087.

Una estructura será durable cuando cumpla eficientemente su vida útil sin necesidad de reparaciones o reforzamiento.

Tabla 5

Requisitos para condiciones especiales de exposición

Condición de exposición	a/c máxima	f'c mín. (kg/cm ²)
Concreto con baja permeabilidad y expuesto al agua	0.5	280
Concreto expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo en condición húmeda o a productos químicos descongelantes	0.45	310
Protección de la corrosión al acero cuando el concreto está expuesto a cloruros, sal, agua salobre, agua de mar o a salpicaduras del mismo origen.	0.40	350

Nota. Tomada de Reglamento nacional de edificaciones E060

Tabla 6

Requisitos para concreto expuesto a soluciones de sulfatos

Exposición a sulfatos	%Peso de SO ₄ soluble en agua presente en el suelo	Sulfato (SO ₄) en el agua, ppm	Tipo de Cemento	a/cmax,	f'c mín kg/cm ²
Insignificante	0.0<SO ₄ <0.1	0< SO ₄ <150	-	-	-
Moderada	0.1<SO ₄ <0.2	150< SO ₄ <1500	II, IP(MS), IS(MS), P(MS), I(PM)(MS), I(SM)(MS)	0.5	280
Severa	0.2< SO ₄ <2.0	1500< SO ₄ <10000	V	0.45	310
Muy Severa	2.0<SO ₄	10000< SO ₄	Tipo V más puzolana	0.45	310

Nota. Tomado de RNE-E060

Asimismo, en RNE E-060, en el Artículo 4.2.2. indica las relaciones máximas agua-material cementante y con la resistencia mínima f'c señaladas en ésta, para condiciones de

exposición climáticas y para el caso de exposición a sulfatos en el Artículo 4.3.1, se establece que el concreto que va a estar expuesto a soluciones o suelos que contengan sulfatos debe cumplir con los requisitos de a/c máxima, resistencia mínima y tipo de cemento, que proporcione resistencia a los sulfatos, y en el Artículo 5.2.1., se indica que la dosificación de los materiales para el concreto debe establecerse para permitir que:

A. Se logre la trabajabilidad y consistencia que permitan colocar fácilmente el concreto dentro del encofrado y alrededor del refuerzo bajo las condiciones de colocación que vayan a emplearse, sin segregación ni exudación excesiva.

B. Se logre resistencia a las condiciones especiales de exposición a las que pueda estar sometido el concreto.

C. Se cumpla con los requisitos de los ensayos de resistencia del artículo 5.6 de la norma E.060.

NTP 339.03 2020: Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto, en muestras cilíndricas

Aquí presento algunas consideraciones muy importantes:

Artículo 5.3.- Los resultados de este método de ensayo son usados como una referencia para el control de calidad del concreto, proporciones, mezclado y operaciones de colocación: determinación del cumplimiento con las especificaciones; control para la evaluación de la efectividad de los aditivos; y usos similares.

Artículo 7.1.- Las probetas no serán ensayadas si cualquier diámetro individual de un cilindro difiere de cualquier otro diámetro del mismo cilindro por más del 2 %.

Artículo 8.5.1.- La carga será aplicada a una velocidad de movimiento correspondiendo a una velocidad de esfuerzo sobre la probeta de $0,25 \pm 0,05$ MPa/s. La velocidad de movimiento diseñada será mantenida al menos durante la mitad final de la fase de carga anticipada.

Artículo 9.2.- Si la relación de la longitud del espécimen al diámetro es 1,75 o menor, corregir el resultado obtenido por un apropiado factor de corrección.

Profundidad de penetración de agua bajo presión EN 12390 (AENOR, 2020)

Mide la profundidad de penetración de agua en muestras de hormigón sometida a 0,5 MPa (72,5 psi, 5 bar) de presión hidrostática durante un periodo de tres días. Se realizan especímenes de concretos curados durante 28 días. Después del curado, las muestras se colocan en el dispositivo. Los soportes de muestra están abiertos en ambos extremos, con un extremo sometido a la presión hidrostática. Después de tres días, las muestras se retiran del aparato de ensayo. Por último, se mide la profundidad máxima de penetración de agua en la muestra. La figura N° 3 a continuación muestra el dispositivo que se emplea para realizar este ensayo.

Figura 3

Cámara de curado con controlador de temperatura y humedad relativa, UNI-LEM



Nota: Elaboración propia.

Procedimiento de medición por método de presión según NTC 4483 (INCONTEC, 2020)

Para determinar el coeficiente de permeabilidad (K) se requieren probetas cilíndricas de 15cm de diámetro por 15cm de altura como mínimo, con un tiempo de curado mayor a 28 días, para asegurar que se haya completado la hidratación del cemento. Luego, se desgastarán

las caras superior e inferior para evitar tomar datos errados, ya que tienen propiedades distintas que las del interior de la probeta.

Se secan las muestras, hasta peso constante, en una estufa a 80°C, luego se impermeabilizará la superficie lateral de cada una de las muestras, mediante el uso de una pintura impermeabilizante

Después se las colocará en el equipo de ensayo, aplicando una presión de agua de 0.5 MPa, dejando las probetas a esta presión por 4 días hasta que ocurra una de las dos opciones.

Caso 1: Si el agua atraviesa la muestra, se mide un flujo de agua.

En este primer caso el agua atravesará por completo el espécimen, es decir se saturará el espécimen y se notará un flujo de agua en la cara opuesta a la que se aplica la presión.

Una vez se establece flujo constante, se determinará el volumen de agua que atravesará el espécimen en un tiempo determinado, bien sea haciendo mediciones de nivel de agua en la probeta graduada o midiendo el flujo en un recipiente contra el tiempo. Se puede calcular el coeficiente de permeabilidad con la siguiente ecuación.

$$a) \quad K = \frac{\rho g L Q}{P A}$$

Dónde:

K: Coeficiente de permeabilidad (m/s)

ρ : Densidad del agua (kg/m³)

g: Aceleración de la gravedad (m/s²)

L: Longitud del espécimen (m)

Q: Caudal de agua (m³/s)

P: Presión de agua (N/m²)

A: Área transversal del espécimen (m²)

Caso 2: Si el agua no atraviesa la muestra, se mide la profundidad de penetración de agua.

Una vez cumplidos los 2 días sin haber registrado flujo constante, inmediatamente se secciona el espécimen perpendicularmente a la cara sobre la cual se aplicó la presión de agua, mediante el ensayo de tracción indirecta y se mide la profundidad promedio de penetración. Una vez se ha determinado la profundidad promedio de penetración, es posible deducir el coeficiente de permeabilidad por medio de la ecuación:

$$K = \frac{D^2 v}{2Th}$$

Dónde:

K: Coeficiente de permeabilidad (m/s)

D: Profundidad de penetración (m)

v: Porosidad (determinada por ASTM C642)

T: Tiempo necesario para penetrar la profundidad D (s)

h: Carga de presión de agua (m)

En esta investigación mediremos la permeabilidad utilizando NTC 4483:1998 y UNE EN 206-1:2008, para determinar los valores de K.

III. MÉTODO

3.1. Tipo de Investigación

De acuerdo con la orientación

La investigación será aplicada, puesto que está orientada a lograr nuevos conocimientos y que está centrada en proponer o estimar valores de permeabilidad del concreto con adiciones para dar solución a una problemática actual del concreto expuesto a humedad.

De acuerdo con la contrastación

De acuerdo con la técnica de contrastación la investigación será explicativa, puesto que permitirá el análisis de las relaciones entre las diferentes variables y se contara con un grupo de control tal y como se presentan en la realidad observable, así mismo, se considerará la intervención de la acción de adiciones para conocer la respuesta de la otra variable (permeabilidad del concreto).

De acuerdo con direccionalidad

La investigación será prospectiva de acuerdo con la direccionalidad, considerando que la investigación estudiará un fenómeno cuya causa está en el presente y el efecto será en el futuro, describiendo los eventos que ocurrirán.

De acuerdo con el tipo de fuente de recolección de datos

De acuerdo con el tipo de fuente de recolección de datos, la investigación será proyectiva ya que la información se recogerá con los criterios propios y para fines específicos del presente estudio.

De acuerdo con la evolución del fenómeno estudiado

La investigación será transversal de acuerdo con la evolución del fenómeno estudiado, puesto que las variables se medirán en una sola oportunidad y corresponderán al año 2020-2021.

De acuerdo con la comparación de las poblaciones

Y de acuerdo con la comparación de las poblaciones, la investigación será comparativo, ya que se busca comparar rangos del coeficiente de permeabilidad con diferentes contenidos de adiciones.

Nivel de investigación

El nivel de la investigación es Nivel IV, predictivo II; tomando en cuenta que buscara identificar un futuro probable que puede ser solo de comportamiento o cambio total, por medio de hipótesis y basado en la estadística (Córdova y Carolina, 2013)

Diseño de investigación

La investigación será experimental puro (Tabla N.º 7), ya que las muestras fueron elaboradas en condiciones de laboratorio y luego ensayadas para obtener las propiedades de interés en la investigación.

Tabla 7

Resumen del diseño de investigación

Orientación	Técnica de contrastación	Direccionalidad	Tipo de fuente	Evolución de caso de estudio	Población
Aplicada	Experimental	Prospectividad	Retrolectiva	Transversal	Comparativa

Nota: Elaboración propia.

Estrategia de prueba de Hipótesis

Para el desarrollo de la investigación se realizaron muestras de probetas cilíndricas de concreto, según las variables consideradas. Para sustentar la hipótesis anteriormente formulada, se operacionalizará las variables de estudio y con los resultados experimentales del ensayo de permeabilidad, se evaluará si las adiciones minerales pueden controlar el coeficiente de permeabilidad del concreto, analizando además la influencia de cada una de las variables

Pasos para sustentar la hipótesis:

Paso 1: Planteamiento de la hipótesis de la investigación

Hipótesis principal: La adición de minerales ultrafinos controlaría la permeabilidad del concreto.

Hipótesis secundarias:

A. La adición de Microsílice en la mezcla de concreto controlaría la permeabilidad.

B. La adición de puzolana en la mezcla de concreto controlaría la permeabilidad.

C. La adición de Metacaolín en la mezcla de concreto controlaría la permeabilidad.

Paso 2: Análisis de los estadísticos de las muestras de concreto

Se realizó un análisis estadístico de los valores de permeabilidad para cada grupo de concreto: Metacaolín, puzolana, Microsílice y sin adición.

Paso 3: Gráficas de las permeabilidades de las muestras de concreto

Se realizaron gráficas de los valores de permeabilidad para cada grupo de concreto: Metacaolín, puzolana, Microsílice y sin adición.

Paso 4: Para validar las hipótesis principales y secundarias planteadas, se utilizaron para cada caso la prueba de t-Student de dos muestras, para verificar si las medias del coeficiente de permeabilidad de los concretos sin adición y el coeficiente de permeabilidad de los concretos adicionados son diferentes o iguales. Como paso previo a la prueba de t-Student, se analizaron las dos muestras aplicando la prueba F – Snedecor, a fin de verificar si las varianzas del coeficiente de permeabilidad de los concretos sin adición y el coeficiente de permeabilidad de los concretos adicionados son diferentes o iguales.

Paso 5: Correlación de las variables de fabricación del concreto con el coeficiente de permeabilidad del concreto.

Se realizó el análisis estadístico para determinar la correlación de las 16 variables de fabricación del concreto, a fin de establecer el grado de incidencia de cada una de ellas con el coeficiente de permeabilidad.

Paso 6: Utilizando las redes neuronales artificiales (perceptrón multicapa), se realizaron 6 arquitecturas de redes neuronales con el fin de pronosticar el coeficiente de permeabilidad a partir de los datos de fabricación de 457 muestras de concreto, de las cuales 366 muestras se utilizaron en la etapa de entrenamiento y 91 muestras en la etapa de validación.

Paso 7: Verificación de la incidencia de la edad de la muestra en la permeabilidad del concreto, utilizando la prueba de t-Student.

3.2.Población y Muestra

Universo

Estructuras de concreto en contacto con la humedad.

Población

La población de la presente investigación son los concretos adicionados con Microsílice, Metacaolín y puzolana.

Tamaño muestral

La muestra está definida como la cantidad de resultados de ensayos de laboratorio para las distintas relaciones agua – cemento y diferentes contenidos de adiciones minerales.

El número total recopilado fue de 457 cilindros de concreto con dimensiones de: 15 cm de diámetro x 15 cm de altura, de las cuales 142 probetas contienen Microsílice, 105 contienen Metacaolín y 86 contienen puzolana y 124 no contienen ninguna adición mineral.

Se cumplen con criterios estadísticos para determinar el número mínimo de muestras: En distribuciones estadísticas, la desviación estándar es una medida de la variabilidad de los valores medidos para una variable:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(X - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

Siendo:

σ = desviación estándar de un conjunto de datos.

X = valor de un conjunto de datos.

\bar{X} = Promedio de los valores.

n = número de observaciones.

Cuando el número de ensayos es superior a 30, en la anterior ecuación, $n-1$, puede reemplazarse por n .

Una característica matemática de la distribución Gaussiana (o distribución normal), es que el 68.27% de los datos se encuentra dentro de una desviación estándar 1 de la media, y que el 95.45% de los datos dentro de una desviación estándar igual a 2.

La desviación estándar, expresada como un porcentaje de la resistencia media, se denomina coeficiente de variación:

$$V = \frac{\sigma}{\bar{X}} \cdot 100$$

Siendo:

V = coeficiente de variación.

σ = desviación estándar.

\bar{X} = resistencia media.

El coeficiente de variación hace posible expresar el grado de dispersión en valor porcentual mejor que en un valor absoluto. Este coeficiente de variación “V” también puede ser utilizado como un índice del grado de control y el estándar general de calidad del hormigón. En las siguientes tablas N.º 8 y N.º 9 se muestran los valores de coeficiente de variación que pueden esperarse en proyectos vigilados.

Tabla 8

Estándar de control del concreto, ACI 214R.

<i>Desviación estándar, s, para la población total</i>	<i>Coficiente de variación, V,</i>
---------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------

<i>Kg/cm³</i>	<i>Mpa</i>	<i>Psi</i>	<i>dentro de la prueba</i>	<i>Estándar de control de calidad</i>
<i>Hasta 28</i>	<i>Hasta 2.8</i>	<i>Hasta 400</i>	<i><3.0</i>	<i>Excelente</i>
<i>28 a 35</i>	<i>2.8 a 3.4</i>	<i>400 a 500</i>	<i>3.0 a 4.0</i>	<i>Muy bueno</i>
<i>35 a 42</i>	<i>3.4 a 4.1</i>	<i>500 a 600</i>	<i>4.0 a 5.0</i>	<i>Bueno</i>
<i>42 a 49</i>	<i>4.1 a 4.8</i>	<i>600 a 700</i>	<i>5.0 a 6.0</i>	<i>Aceptable</i>
<i>>49</i>	<i>>4.8</i>	<i>>700</i>	<i>>6</i>	<i>deficiente</i>

Nota: Elaboración propia.

Tabla 9

Estándar de control del concreto para $f'c > 5000\text{psi}$ (35 MPa), ACI 214R-19

<i>Clase de operación</i>	<i>Desviación estándar para diferentes niveles de control</i>				
	<i>Excelente</i>	<i>Muy bueno</i>	<i>Bueno</i>	<i>Aceptable</i>	<i>Deficiente</i>
<i>Construcciones en general</i>	<i>7</i>	<i>7 a 9</i>	<i>9 a 11</i>	<i>11^a 14</i>	<i>Más de 14</i>
<i>Muestras de laboratorio</i>	<i>3.5</i>	<i>3.5 a 4.5</i>	<i>4.5 a 5</i>	<i>5 a 7</i>	<i>Más de 7</i>

Nota: Elaboración propia.

Aplicando estas expresiones y consideraciones se obtiene:

$$n = \frac{\sum_1^n (f_i - f)}{\nabla} + 1$$

Para $f_i=300$; $f=250$; $\nabla=5$ (condiciones de laboratorio) reemplazando se obtiene: $N=3$ cilindros para cada tipo de análisis que se requiera en condiciones de laboratorio

3.3.Operacionalización de las Variables

Variables

Variables - Hipótesis Principal

VI: Adiciones minerales ultrafina

VD: Permeabilidad del concreto

Variables - Hipótesis Secundarias

b) VI: Microsílice

VD: Permeabilidad del concreto

c) VI: Puzolana

VD: Permeabilidad del concreto

d) VI: Metacaolín

VD: Permeabilidad del concreto en estado endurecido

Definición operacional de variables

Para efectos de analizar las variables de la investigación, se deberá conocer los resultados del estudio de los indicadores contemplados, para ello se recurrirá a los ensayos de laboratorio en los cuales se utilizarán métodos de ensayo estandarizados, personal técnico calificado y equipos calibrados siguiendo los parámetros de calidad de las normas ISO 9000 y ISO 17025 vigentes.

Variables de la hipótesis principal

Variable Independiente: Adiciones minerales ultrafinas

Se han seleccionado 3 tipos de adiciones minerales más utilizadas en el Perú (Microsílice, puzolana, Metacaolín), se realizarán varias mezclas de concreto incorporando estas adiciones minerales ultrafinas y además variando el tipo y contenido de la adición mineral.

Variable dependiente: Permeabilidad del concreto en estado endurecido

El coeficiente de permeabilidad se caracterizó con ensayos de laboratorio utilizando muestras de probetas cilíndrica y aplicando el “Método de ensayo para determinar la permeabilidad del concreto al agua”, según la NTC 4483.

Variables de las hipótesis secundarias

A. Hipótesis secundaria

- Variable independiente: Microsílice

Este tipo de adición mineral se incorporará en la etapa de mezclado de concreto, a partir de ello se realizarán mezclas de concreto variando el contenido de adición mineral, en porcentajes de reemplazo de 5 y 10% en peso del material cementante.

- Variable dependiente: Permeabilidad del concreto en estado endurecido.

La permeabilidad del concreto se caracterizará con ensayos de laboratorio utilizando muestras de probetas cilíndrica y aplicando el “Método de ensayo para determinar la permeabilidad del concreto al agua”, según la NTC 4483, en m/s.

B. Hipótesis secundaria 2

- Variable independiente: Puzolana

Este tipo de adición mineral se incorporará en la etapa de mezclado de concreto, a partir de ello se realizarán mezclas de concreto variando el contenido de adición mineral, en porcentajes de reemplazo de 10, 15 y 20% en peso del material cementante.

- Variable dependiente: Permeabilidad del concreto en estado endurecido.

La permeabilidad del concreto en estado se caracterizará con ensayos de laboratorio utilizando muestras de probetas cilíndrica y aplicando el “Método de ensayo para determinar la permeabilidad del concreto al agua”, según la NTC 4483 en m/s

C. Hipótesis secundaria 3

- Variable independiente: Metacaolín

Este tipo de adición mineral se incorporará en la etapa de mezclado de concreto, a partir de ello se realizarán mezclas de concreto variando el contenido de adición mineral, en porcentajes de reemplazo de 10 y 15% en peso del material cementante.

- Variable dependiente: Permeabilidad del concreto en estado endurecido.

La permeabilidad del concreto en estado endurecido se caracterizará con ensayos de laboratorio utilizando muestras de probetas cilíndrica y aplicando el “Método de ensayo para determinar la permeabilidad del concreto al agua”, según la NTC 4483, en m/s.

Indicadores

Indicadores de la hipótesis principal

- Porcentaje de adición (%)
- Tipo de adición (Microsílice, puzolana, metacaolín)
- Coeficiente de permeabilidad del concreto adicionado (m/s)

Indicadores de las hipótesis secundarias

A. Indicadores de la hipótesis secundaria 1

- Porcentaje de microsíllice (5 y 10%)
- Permeabilidad del concreto endurecido (m/s)

B. Indicadores de la hipótesis secundaria 2

- Porcentaje de puzolana (10, 15 y 20%)
- Permeabilidad del concreto endurecido (m/s)

C. Indicadores de la hipótesis secundaria 3

- Porcentaje de metacaolín (10 y 15%)
- Permeabilidad del concreto endurecido (%)

3.4. Instrumentos

Tabla 10

Técnicas, instrumentos y fuentes de recolección de datos

Objetivo	Técnica	Instrumento	Fuente
Diseño de mezclas de concreto	Método de combinación de Fuller	Hoja de cálculo	LEM- UNI
Determinación del asentamiento de la mezcla de concreto	NTP 339.035	Observación	Ensayo de laboratorio
Contenido de aire y peso unitario del concreto en estado fresco	NTP 339.046	Formato de ensayo	Ensayo de laboratorio
Peso unitario y contenido de humedad de agregados	NTP 400.017	Formato de ensayo	Ensayo de laboratorio

Peso específico y absorción de agregados	NTP 400.021-NTP 400.022	Formato de ensayo	Ensayo de laboratorio
Determinación de contenido de vacíos del concreto	ASTM C642	Formato de ensayo	Ensayo de laboratorio
Determinación de la penetración de agua bajo presión	NTC 4483	Formato de ensayo	Ensayo de laboratorio
Cálculo del coeficiente de permeabilidad del concreto	NTC 4483	Formato de ensayo	Ensayo de laboratorio

Nota: Elaboración propia.

3.5.Procedimientos

Diseño Estadístico

Se aplicó el Test de Grubbs, para identificar los valores atípicos de los coeficientes de permeabilidad obtenidos para cada diseño de concreto realizado.

Se realizó la prueba de F-Snedecor, para verificar si las varianzas de los valores de coeficiente de permeabilidad obtenidos en dos diseños de concreto (concreto sin adición y concreto con adición), son iguales o diferentes.

Para la validación de la hipótesis principal e hipótesis secundarias, se realizó la prueba de t – Student para dos muestras, para verificar si las medias de los valores de coeficiente de permeabilidad obtenidos en dos diseños de concreto (concreto sin adición y concreto con adición), son iguales o diferentes.

Complementariamente, se utilizó el t – Student, para verificar si existen diferencias estadísticas entre los valores de permeabilidad ensayados a edades mayores a 28 días.

Finalmente, con todos los valores del coeficiente de permeabilidad de los concretos sin adición y concretos adicionados, se analizaron 6 arquitecturas de redes neuronales artificiales (del tipo perceptrón multicapa), para conseguir la red neuronal que tenga la mayor capacidad de pronóstico del coeficiente de permeabilidad a partir de los datos de fabricación del concreto.

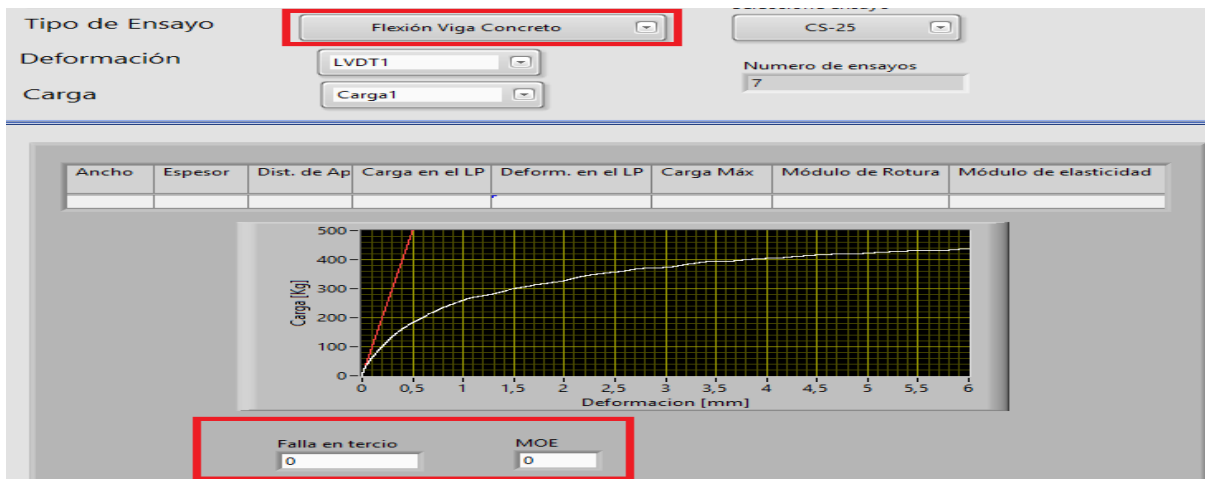
3.6.Análisis de Datos

Técnica de procesamiento de datos

Se utilizaron los siguientes dispositivos para la adquisición de datos: Software “Soft-civil” dotado de 8 LVDT, 8 Celdas de carga; adquisición y procesamiento de datos, cálculos relacionados al ensayo de materiales, operación en tiempo real entre data perteneciente a dos sensores diferentes, visualización de 3 tipos de curvas (Carga vs deformación, Esfuerzo vs deformación unitaria, Carga vs Tiempo), visualización de data histórica y generación de reportes (Figura N.º 4 y Figura N.º 5).

Figura 4

Adquisición de datos con el software "SoftCIVIL"



Nota: Elaboración propia.

Utilizando el software Soft Civil se puede seleccionar el tipo de muestra (cilíndrica o cubica); la velocidad de carga y se puede visualizar en forma grafica el tiempo que demoro el ensayo

Figura 5

Registro de data en el software SoftCIVIL



Nota: Elaboración propia.

El equipo de adquisición de datos consta de las siguientes componentes:

- Traductores de desplazamiento de 5 cm con aproximación de 0.00003mm.
- Strain gages para determinación de deformaciones.
- Software Test expert versión 6.

Técnica de análisis e interpretación de la información

Se utilizaron técnicas de estadística descriptiva: coeficientes de correlación, desviación estándar, varianza, cuartiles.

Para el análisis de valores atípicos de medidas realizadas, se utilizó el test de Grubbs:

A. Test de Grubbs. Esta prueba ha sido aplicada a los valores de permeabilidad que pertenecen a un mismo diseño de concreto. Esta prueba estadística permite identificar la presencia de un valor atípico en un conjunto de datos. Para usar esta prueba, el conjunto de datos debe tener una distribución aproximadamente normal.

B. Prueba de F – Snedecor; es una distribución de probabilidad continua; de gran aplicación en la inferencia estadística, para la contratación de la igualdad de varianzas de dos poblaciones normales, mediante esta técnica se detectó la existencia de diferencias significativas entre muestras diferentes.

C. Prueba de t-Student; inicialmente se diseñó para examinar las diferencias entre dos muestras independientes y pequeñas que tengan distribución normal y homogeneidad en

sus varianzas; es una prueba de hipótesis estadística que se usa para establecer si la media poblacional desconocida es diferente de un valor específico.

Validación de instrumentos

Todos los ensayos se realizaron en el laboratorio de ensayos de materiales de la UNI; que cuenta con certificación ISO 9000; por lo cual sus procedimientos están debidamente acondicionados de acuerdo con normas técnicas de ensayos vigentes, asimismo todos los equipos utilizados cuentan con certificados de calibración vigentes a la fecha de los ensayos y el personal técnico de apoyo está capacitado.

Todos los métodos de ensayo han sido realizados bajo los estándares de las normas técnicas, que incluyen en todos los casos, los formatos para el registro de la información que se adjunta en los anexos.

Complementariamente, se ha utilizado la red neuronal perceptrón multicapa, para validar los valores del coeficiente de permeabilidad obtenidos experimentalmente en el laboratorio, consiguiendo correlaciones de $R=96.2\%$ para el entrenamiento y un valor de $R=95.7\%$, para el pronóstico: mediante esta herramienta matemática se puede predecir el valor de la permeabilidad.

Descripción Del Procedimiento

Etapas 1: selección de materiales

Para la investigación se utilizaron materiales locales para fabricar probetas cilíndricas de concreto de 15x15 cm, para realizar los ensayos de permeabilidad, probetas de 10x20 cm, para ensayo de vacíos permeables y probetas de 15x30 cm. Los materiales utilizados se presentan a continuación.

Agregados

Los agregados, tanto el grueso, como el fino, son procedentes de la cantera Jicamarca, ubicada en Lurigancho-Chosica; se utilizó el agregado grueso perteneciente al Huso 67, para un mejor acomodo entre los agregados y evitar zonas débiles en la zona de interfaz entre la pasta hidratada de cemento y los agregados.

Cemento

En todos los diseños se utilizó cemento Portland tipo I, de uso general, que cumple con la NTP 339.009

Agua

El agua que se utilizó en los diseños fue de la red pública de Lima.

Aditivo

Se empleó un aditivo superplastificante de tercera generación y de alto rango, de la marca Sika Viscocrete 20HE, para ayudar en la trabajabilidad del concreto; las dosificaciones se obtuvieron mediante ensayos de consistencia, y en todos los casos la consistencia estuvo entre 3 y 4”.

Adiciones minerales Ultrafinas

Las adiciones minerales ultrafinas que se emplearon en la investigación fueron la Microsílice, Metacaolín, y puzolana.

Estos materiales ultrafinos están siendo empleados en el mundo entero y en nuestro país con la globalización están llegando empresas constructoras internacionales que lo usan para mejorar propiedades del concreto.

La Microsílice utilizada fue Sika Fume y la adición de Metacaolín fue proporcionada por la empresa Consorcio Túnel Callao, la puzolana fue donada por la empresa UNACEM, para la investigación.

A continuación, la Tabla N.º 11 presenta un resumen de las características de los materiales.

Tabla 11

Procedencia de los materiales para elaboración del concreto

MATERIALES	PROCEDENCIA
Arena	Cantera Jicamarca
Piedra	Cantera Jicamarca
Cemento	Sol Portland Tipo I
Agua	Potable
Metacaolín	Consorcio Túnel Callao
Microsílice	Sika Fume
Puzolana	UNACEM
Aditivo	Sika Viscocrete 20HE

Nota: Elaboración propia.

Etapa 2: Procedimientos

Los procedimientos utilizados en la realización de los ensayos de laboratorio fueron acordes a las normativas nacionales e internacionales vigentes. Se aplicaron los procedimientos de los ensayos indicados en las NTP, ASTM, UNE y la NTC, para poder realizar ensayos que no se encontraron en la normativa nacional, tales como: ensayo de penetración de agua y permeabilidad.

Marco normativo de ensayos

A continuación, la Tabla N.º 12 presenta un listado de las normas aplicadas en los ensayos de laboratorio realizados.

Tabla 12

Marco normativo de los ensayos de laboratorio realizados, elaboración propia.

Procedimientos	Normativa
Diseño de mezcla	ACI 211.1
Asentamiento	NTP 339.035
Contenido de aire y peso unitario	NTP 339.046
Resistencia a la compresión	NTP 339.034
Peso unitario y contenido de humedad	NTP 400.017
Peso específico y absorción	NTP 400.022

Determinación del módulo elástico	ASTM C469
Determinación de vacíos permeables	ASTM C 642
Determinación de la penetración de agua bajo presión	NTC 4483

Nota: Elaboración propia.

Etapa 3: investigación de las propiedades de los materiales

Agregados

Agregado fino

Consistente en agregado natural, cuyas partículas pasan el tamiz 3/8" y queda retenido en la malla N.º 200.

Propiedades físicas

En la Tabla N° 13, se presenta los resultados de las propiedades físicas del agregado fino necesarias para el cálculo de las dosificaciones del concreto.

Tabla 13

Propiedades físicas del agregado fino

PROPIEDAD	UNIDAD	VALORES	NORMAS
Peso unitario suelto	Kg/m ³	1620	NTP 400.017
Peso unitario compactado	Kg/m ³	1854	NTP 400.018
Contenido de humedad	%	2.27	NTP 339.185
Peso específico de masa	Kg/m ³	2670	NTP 400.022
PE superficialmente seco	Kg/m ³	2700	NTP 400.022
% absorción	%	1.13	NTP 400.022
Módulo de fineza		3.02	NTP 400.012

Nota: Elaboración propia.

Análisis granulométrico

El agregado fino utilizado cumple con los límites granulométricos de la N.T.P. 400.037, el resultado del análisis granulométrico se presenta en la Tabla N.º 14.

Tabla 14

Resultado del análisis granulométrico del agregado fino

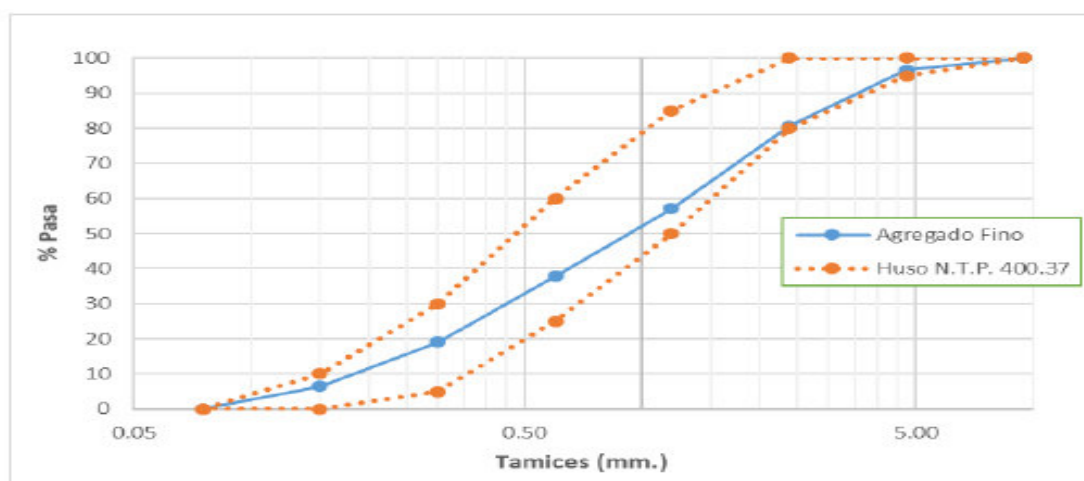
Tamiz		Peso retenido (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasa
Pulg.	mm.				
3/8"	9.50	0	0	0	100
N°4	4.75	33.80	3	3	97
N° 8	2.38	160.40	16	19	81
N°16	1.19	235.00	24	43	57
N°30	0.60	192.90	19	62	38
N°50	0.30	187.00	19	81	19
N°100	0.15	126.40	13	94	6
Fondo	0.075	64.50	6	100	0
TOTAL		1000.00	100		

Nota: Elaboración propia.

La curva granulométrica del agregado fino se presenta en la figura N.º 6. Se observa que el agregado se encuentra dentro de los límites de la N.TP. 400.037.

Figura 6

Curva granulométrica del agregado fino



Nota: La gráfica muestra el porcentaje de agregado fino pasa por cada tamiz estandarizado (%pasa) y la abertura en milímetros de cada tamiz (Tamices (mm.)).

Agregado grueso

Material de origen natural producto de la disgregación de las rocas, cuyas partículas quedan retenido en el tamiz N.º 4, procedente de la cantera Jicamarca, producido mediante el chancado de la roca natural.

Propiedades físicas

En la Tabla N.º 15, los resultados de las propiedades físicas del agregado grueso.

Tabla 15

Propiedades físicas del agregado grueso

PROPIEDAD	UNIDAD	VALORES	NORMAS
Peso unitario suelto	Kg/m ³	1470	NTP 400.017
Peso unitario compactado	Kg/m ³	1599	NTP 400.018
Contenido de humedad	%	0.30	NTP 339.185
Peso específico de masa	Kg/m ³	2690	NTP 400.022
PE superficialmente seca	Kg/m ³	2720	NTP 400.022
% absorción	%	1.21	NTP 400.022
Módulo de fineza		6.33	NTP 400.012

Nota: Elaboración propia.

Análisis granulométrico

El agregado grueso utilizado pertenece al Huso 67, en la Tabla N.º 16 se muestra el resultado del análisis granulométrico.

Tabla 16

Análisis granulométrico del agregado grueso

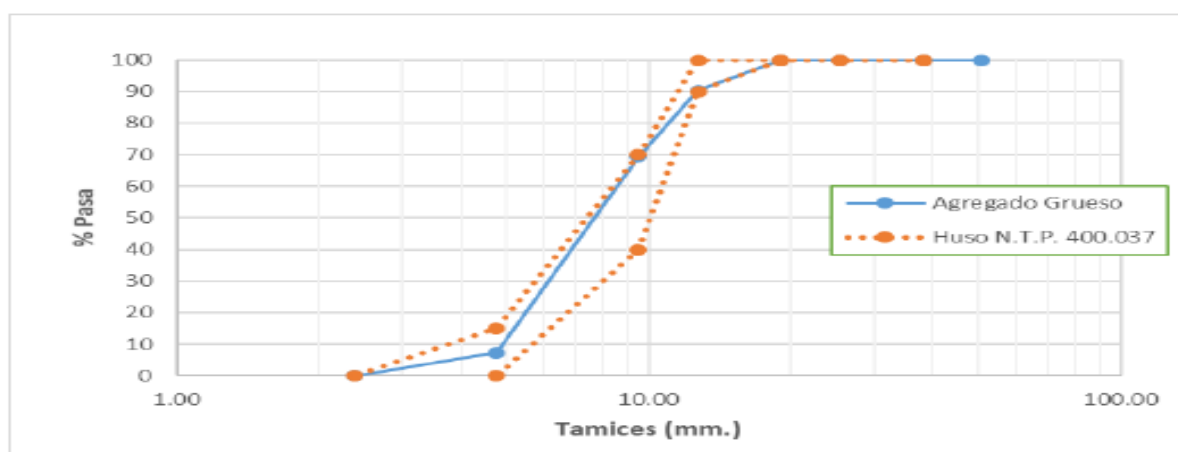
Tamiz		% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasa
Pulg.	mm.			
3/4"	19.05	0	0	100
1/2"	12.7	36.9	36.9	63.1
3/8"	9.5	23.9	60.8	39.2
Nº4	4.75	34.1	94.9	5.1
Nº8	2.38	3.3	98.2	1.8
Nº16	1.18	0.5	98.7	1.3
Nº30	0.96	0.2	98.9	1.1
Nº50	0.2	0.1	99.0	1.0
Nº100	0.15	0.1	99.1	0.9
Fondo		0.9	100	0.0
TOTAL		100		

Nota: Elaboración propia.

La curva granulométrica del agregado grueso se presenta en la figura N.º 7, en ella se puede evidenciar gráficamente que el agregado se encuentra dentro de los límites de la N.TP. 334.037 y pertenece al Huso 67.

Figura 7

Curva granulométrica del agregado grueso, elaboración propia



Nota: La gráfica muestra el porcentaje de agregado grueso que pasa por cada tamiz estandarizado (%pasa) y la abertura en milímetros de cada tamiz (Tamices (mm.)).

Cemento

El cemento portland utilizado corresponde a la marca Sol Tipo I, en bolsas de 42.5kg NTP 334.009. En las siguientes tablas N.º 17 y 18 se muestran la composición química y físicas del cemento.

Tabla 17

Requisitos mínimos del cemento Portland

Composición química	Cemento Portland tipo I
Óxido Férrico (Fe ₂ O ₃), % máx	-
Óxido de Magnesio (MgO)	6.0
Trióxido de Azufre (SO ₃), %máx	
Cuando C ₃ A ≤ 8%	3.0
Cuando C ₃ A > 8%	3.5
Pérdida por ignición, % máx	3.0
Residuo insoluble, % máx	0.75

Nota: Elaboración propia.

Tabla 18

Requisitos físicos del cemento Portland – NTP_334.090

Características	Cemento Portland tipo I
Contenido de aire del mortero, %volumen	
Máx.	12
Mín.	-
Finura, superficie específica (m ² /kg)	
Ensayo de tubridímetro (N.T.P 334.072), mín	160
Ensayo de permeabilidad (N.T.P 334 002), mín	280
Expansión de autoclave (N.T.P 334 004),	0.80
Resistencia (N.T.P 334 051) no menor que los valores mostrados para las edades indicadas a continuación, Resistencia a la compresión (mpa),	
1 día	-
3 días	12.0
7 días	19.0
20 días	-
Ensayo de gilmore (minutos)	
Fraguado inicial. No menor que, min	60
Fraguado final, no mayor que, min	600
Ensayo de vicat (N.T.P 334 006) (minutos)	
Tiempo de fraguado, no menor que, min	45
Tiempo de fraguado, no mayor que, min	375

Nota: Elaboración propia.

Agua

El agua utilizada, es de la red de agua potable de Lima Metropolitana procedente de la atarjea.

Aditivo superplastificante

El aditivo utilizado para el diseño de mezcla fue el superplastificante Sika Viscocrete 20 HE, que permitió lograr concretos con buena trabajabilidad. Cumple con las normas ASTM C-494, tipo F y ASTM C-1017. Para lograr el mejor efecto, el aditivo se combinó con el agua de mezclado.

En la Tabla N.º 19 se presentan las características del producto aditivo superplastificante.

Tabla 19

Características del aditivo superplastificante

Base Química	Policarboxilato en base acuosa
Color	Líquido Marrón, ligeramente transparente
Conservación	12 meses desde su fabricación
Densidad	1.09 Kg/lt
PH	4.5 + - 1
Dosificación recomendada	Para media trabajabilidad: 0.2-0.8% del peso del cemento. Para una alta trabajabilidad, con baja relación agua/cemento y para hormigón autocompactable: 1.0-2.0 % del peso del cemento.

Nota: Tomado de Sika Perú

Adición mineral

Metacaolín

Una de las adiciones minerales ultrafinas utilizadas fue el Metacaolín, material puzolánico artificial silicoaluminoso que se obtiene, de una arcilla llamada caolín; $2SiO_2 \cdot Al_2O_3 \cdot 2H_2O$, S_2AH_2 , que sometida a temperaturas de 650-800 °C, se puede transformar en Metacaolín, $2SiO_2 \cdot Al_2O_3$, S_2A , finamente molido a tamaños mucho menores que el cemento. El producto usado es comercializado como Metacaulim HP Ultra; Las características físicas y químicas del Metacaolín se presentan en la Tabla N.º 20.

Tabla 20*Características químicas del Metacaolín*

Componente	Típico	Resultados		Limite (NR 15.894)	Método de ensayo
		ARPL S.A.	Laboratorio N°21-UNI		
SiO ₂	58%	56.2%	51.5%	44.0% a 65%	ABNT NBR NM 22
Al ₂ O ₃	34%	31.7%	33.9%	32% a 46 %	ABNT NBR NM 11-2
Fe ₂ O ₃	2%	2.3%	1.5%	-	-
TiO ₂	1%	1.5%	-	-	-
CaO	0.1%	0.1%	1.5%	CaO + MgO 1.5%	ABNT NBR NM 11-2
MgO	0.1%	0.8%	1.5%	CaO + MgO 1.5%	ABNT NBR NM 11-2
K ₂ O	1.7%	2.2%	-	-	-
Na ₂ O	0.1%	0.05%	0.5%	≤0.5%	ABNT NBR NM 17
SO ₃	0.0%	0.01%	1.0%	≤1.0%	ABNT NBR NM 16
Pérdida por ignición	2.5%	4.4%	4.0%	≤4.0	ABNT NBR NM 18

Nota: Norma Brasileira NBR 15.894-1, Informe de ARPL Tecnología Industrial S.A. y Laboratorio N° 21-UNI.

Como se puede apreciar la puzolana natural de UNACEM cumple con los requisitos normativos establecidos

Microsílice

La Microsílice es obtenida de la reducción de cuarzo de alta pureza en hornos de arco eléctrico a temperaturas superiores de 2000°C; esta microesfera es 100 veces más pequeña que un grano de cemento, la formación adicional de productos de hidratación da como resultado una matriz cementicia final más densa. La Microsílice usada en las mezclas de concreto fue la Sika Fume. En la Tabla N.º 21 se muestra el análisis químico.

Tabla 21*Análisis químico de la Microsílice*

SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
93%	0.80%	0.40%	0.60%	0.60%	0.20%	1.20%	0.40%

Nota. Tomado de Sika Perú

Puzolana

La puzolana procedente de UNACEM, es un material sílico aluminoso, muy fino que en presencia del agua reacciona con el hidróxido de calcio y forma silicatos de calcio hidratado, generando de esta forma la reducción de los poros en el concreto. Se evaluó la reactividad puzolánica del material en LEM bajo la norma ASTM 618, obteniéndose un valor de 89%; mayor al especificado en los requisitos de puzolana e igual a 75%. Asimismo, se determinó el valor del Peso específico obteniéndose un valor de 2.70 g/cc. En la Tabla N.º 22 se muestra el análisis químico de la puzolana.

Tabla 22

Análisis químico de la puzolana

Análisis Químico	Unidad de medida	Valores
Dióxido de Sílice (SiO ₂)	%	51.15
Óxido de Aluminio (Al ₂ O ₃)	%	8.03
Óxido de Hierro (Fe ₂ O ₃)	%	21.94
Óxido de Calcio (CaO)	%	1.18
Óxido de Magnesio (MgO)	%	0.32
Trióxido de Azufre (SO ₃)	%	5.43

Nota: Elaboración propia.

Etapa 4: Diseño De Mezcla

Los diseños de mezcla se realizaron usando el método de Fuller, obteniéndose del análisis granulométrico los valores de A (% Pasa tamiz N°4, agregado fino), B (% Pasa tamiz N°4, agregado grueso) y C (% Pasa tamiz N°4, parábola de Fuller).

Los porcentajes en volumen de los agregados fueron obtenidos según se muestra en la figura N.º 8 y 9:

Figura 8

Porcentajes que pasan los tamices según la parábola de Fuller, elaboración propia.

TAMIZ		Agregado Fino	Agregado Grueso	Ley de Füller
(pulg.)	(mm.)	% PASA	% PASA	% PASA (P_d)
3"	76.20			245
2 1/2"	63.50			224
2"	50.80			200
1 1/2"	38.10			173
1"	25.40			141
3/4"	19.05		100	122
1/2"	12.70		90	100
3/8"	9.50	100	69	86
N° 4	4.75	97	7	61
N° 8	2.36	81	0	43
N° 16	1.18	57	0	30
N° 30	0.60	38	0	22
N° 50	0.30	19	0	15
N° 100	0.15	6	0	11
N° 200	0.08	0	0	8

Nota: Elaboración propia.

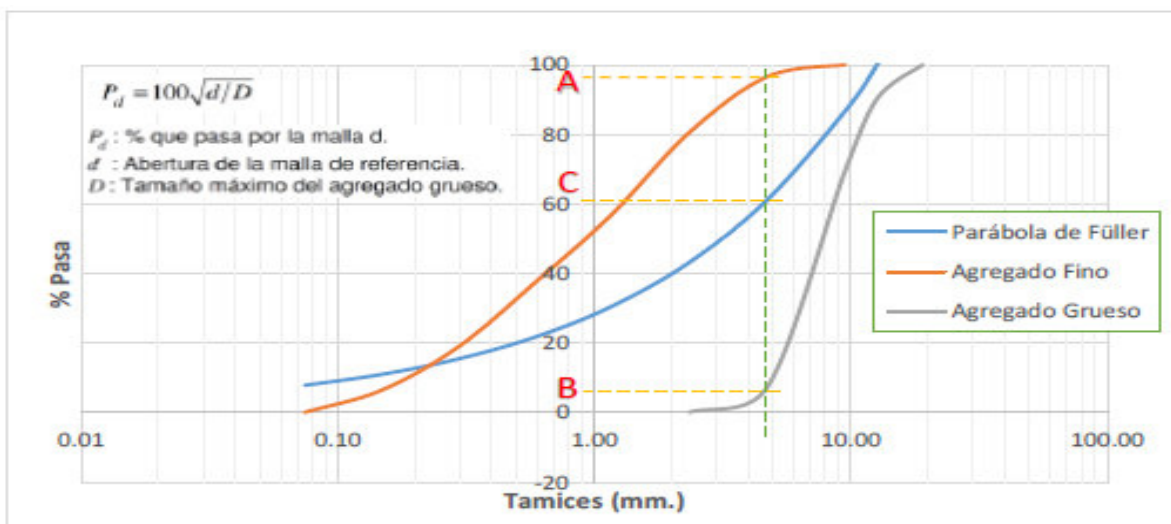
% Volumen del agregado grueso= 40

% Volumen del agregado fino= 60.

Es una característica del método de Fuller a considerar mayores contenidos de agregado fino, mejorando la trabajabilidad y apariencia de las mezclas, las combinaciones que se ajustan a una parábola teórica recomendada que considera la forma del agregado, la consistencia

Figura 9

Graficas granulométricas para el Método de Fuller, elaboración propia



Nota: Elaboración propia.

Se Utilizaron las expresiones siguientes para determinar los contenidos de agregados:

$$\alpha = \frac{C - B}{A - B} * 100$$

$$\beta = 100 - \alpha$$

Donde:

α : Porcentaje de arena

β : Porcentaje de piedra

A: % Pasa tamiz N°4, agregado fino

B: % Pasa tamiz N°4, agregado grueso

C: % Pasa tamiz N°4, parábola de Fuller

Con los valores del agregado, se obtuvo una relación arena/piedra igual a 60/40.

Diseños de Mezcla con Metacaolín

Se elaboraron 120 probetas de concreto de 30 x 15 cm, según ASTM C192/C 192M; correspondiente a 10 diseños de mezcla con 10 y 15% de Metacaolín (fueron curadas y ensayadas a la edad de 28 y 56 días) y cinco relaciones de a/c, recomendadas por ACI 318; y que presentan en la tabla N°13.

Asimismo, utilizando el método de Fuller se calcularon las dosificaciones de las mezclas con adiciones de Metacaolín, que se muestran en la tabla N° 23.

Tabla 23

Proporciones de las mezclas de concreto con Metacaolín

Metacaolín	10%					15%				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cemento	324	324	288	270	252	306	306	272	255	238
Agua	144	162	160	165	168	144	162	160	165	168
Arena	1155	1126	1152	1155	1162	1153	1124	1150	1154	1160
Piedra	777	757	774	777	781	775	756	773	776	780
Aditivo	6.5	6.5	5.4	4.8	4.5	6.5	6.5	5.4	4.8	4.5
a/c	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6

Nota: Elaboración propia.

Diseños de Mezcla con Microsílice

Se elaboraron 175 probetas de concreto de 30x15cm, según ASTM C192/C 192M, variando la adición de Microsílice en porcentajes de 5 y 10%, los ensayos a las edades de 28, 56 y 100 días. Se realizaron 15 diseños de mezcla variando la relación agua-cemento y la cantidad de cemento mínimo.

A continuación, en la Tabla N.º 24 se presenta las dosificaciones utilizadas.

Tabla 24

Proporciones de las mezclas de concreto con Microsílice

Microsílice	5%					10%				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Diseño										
Cemento	342	342	304	285	266	324	324	288	270	252
Agua	143	162	160	164	167	143	161	159	164	167
Arena	935	911	932	935	940	931	908	929	932	937
Piedra	1001	976	998	1007	1006	997	972	995	998	1003
Aditivo	6.1	6.1	5.1	4.8	4.5	6.5	6.5	5.1	4.8	4.5
a/c	0.4	0.5	0.5	0.55	0.6	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6

Nota: Elaboración propia.

Diseños de Mezcla con Puzolana

Se elaboraron 100 probetas de concreto de 30x15cm, según ASTM C192/C 192M, variando la adición de puzolana en porcentajes de 10,15 y 20%, los ensayos se realizaron a las edades de 28, 56 y 100 días. Se realizaron 15 diseños de mezcla para 5 relaciones diferentes de agua-cemento.

A continuación, en la Tabla N.º 25 se presenta las dosificaciones utilizadas.

Tabla 25

Proporciones de las mezclas de concreto con Puzolana

Puzolana	10%				15%				20%			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Diseño												
Cemento	342	324	288	270	323	306	272	255	304	288	256	240
Agua	152	162	160	165	152	162	160	165	152	162	160	165
Arena	980	976	1017	1020	979	975	1016	904	978	974	1015	1018

Piedra	908	905	905	908	907	903	1019	907	905	902	903	906
Aditivo	38	36	32	30	57	54	48	45	76	74	64	60
a/c	0.4	0.45	0.5	0.55	0.4	0.5	0.5	0.6	0.4	0.5	0.5	0.6

Nota: Elaboración propia.

Ensayo de permeabilidad

Para medir la permeabilidad del concreto al agua se utilizó el método de presión, el cual, se encuentra basado en el experimento realizado por Darcy. Los ensayos realizados fueron de acuerdo con lo indicado en la NTC 4483.

En la figura N.º 10 se muestran las probetas de concreto curadas en condiciones normalizadas durante 28 días de fabricadas y sometidas a una presión 0.5 Mpa de agua, durante 4 días, periodo después del cual se someten a las muestras a compresión diametral para determinar la profundidad de humedecimiento de la muestra determinando así la máxima penetración del agua en la muestra, este dato es muy importante para el cálculo del coeficiente de permeabilidad.

Figura 10

Muestras de concreto sometidas a presión de agua, elaboración propia.



Nota: Elaboración propia.

En la figura N.º 11, se observa la profundidad de humedecimiento de la probeta después de haber sido sometido a una presión de agua durante 4 días.

Figura 11

Profundidad de humedecimiento, elaboración propia



Nota: La marca azul señala la zona humedecida en la muestra.

Para determinar el coeficiente de permeabilidad también es necesario conocer el valor del contenido de vacíos permeables en el concreto, para ello se siguieron las recomendaciones de la norma ASTM C 642. Finalmente, con los valores de penetración de agua y el contenido de vacíos permeables, se determinó los valores del coeficiente de permeabilidad.

IV. RESULTADOS

Generalidades

El interés en la investigación fue evaluar la influencia de las adiciones minerales ultrafinas (Puzolana, Metacaolín y Microsílice); en los valores del coeficiente de permeabilidad, para las diferentes relaciones de agua cemento.

Se presentan a continuación los resultados obtenidos de: Profundidad de penetración de agua, % de vacíos y coeficientes de permeabilidad, aplicando procedimientos estandarizados.

Resultados de Profundidad de penetración de agua bajo presión en el concreto para concretos con adición de Metacaolín:

La Tabla N.º 26 y 27 presentan 120 resultados obtenidos a edades de 28 y 56 días para concretos con 10% y 15% de adición de Metacaolín y relaciones de a/c de 0.40,0.45,0.50,0.55 y 0.60

Tabla 26

Resultados de profundidad de penetración del agua a 28 y 56 días con 10% de adición de Metacaolín

Profundidad de penetración del agua (cm)												
Metacaolín= 10%												
Edades	28 días						56 días					
Muestra N°	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
0.40	1.43	1.29	1.36	1.26	1.72	2.20	1.73	1.50	1.29	1.51	1.75	1.42
0.45	1.79	1.73	1.78	1.76	1.64	1.57	1.75	1.43	1.60	1.76	1.88	1.55
0.50	1.74	2.44	2.89	2.24	1.68	2.22	1.83	2.01	1.94	1.79	2.12	2.16
0.55	3.02	2.06	2.30	2.42	2.61	2.83	2.35	2.77	2.54	2.57	2.72	2.27
0.60	2.98	3.15	3.10	3.16	3.02	3.08	3.20	3.30	2.98	3.01	3.50	3.23

Nota: Elaboración propia.

Obsérvese que las mayores profundidades humedecidas por el agua se encontraron para la relación a/c=0.60 y edad de 56 días igual a 3.5 cm; mientras que las menores corresponden a relaciones de a/c= 0.40 y edad de 28 días igual a 1.26 cm; lo que podría ir indicando que a

menores valores de a/c y mayores edades de hidratación se reduce el paso del agua a través de la masa de concreto.

Tabla 27

Resultados de profundidad de penetración del agua a 28 y 56 días con 15% de adición de Metacaolín

Profundidad de penetración del agua (cm)												
Metacaolín 15%												
Edades	28 días						56 días					
Muestra N°	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
0.40	0.80	0.66	0.72	0.75	0.84	0.77	0.72	0.66	0.66	0.68	0.51	0.68
0.45	0.53	0.98	0.64	1.07	0.82	0.94	0.72	0.51	0.75	0.68	0.90	0.84
0.50	1.03	0.59	1.00	1.25	0.92	0.88	0.97	0.95	1.09	0.74	0.89	0.91
0.55	1.06	1.02	0.89	1.19	1.77	1.06	0.88	0.93	1.02	0.85	1.03	0.82
0.60	1.00	0.80	0.65	1.70	1.14	1.03	1.06	1.00	1.34	1.90	1.94	0.87

Nota: Elaboración propia.

Obsérvese que las mayores profundidades humedecidas se encontraron para $a/c=0.60$ y edad de 56 días e igual a 1.94 cm; mientras que las menores corresponden a $a/c= 0.40$ y edad de 56 días e igual a 0.51 cm. Algo similar al caso anterior, se puede decir que a menores relaciones de a/c , mayores edades de hidratación y mayores contenidos de Metacaolín se reduce el paso del agua a través de la masa de concreto.

Resultados de Profundidad de penetración de agua bajo presión en el concreto para concretos con adición de Microsílice

A continuación, se presentan 120 resultados de ensayos de determinación de la profundidad de humedecimiento en muestras con adición de Microsílice, a las edades de curado de 28 y 56 días; para concretos con 5% y 10% (Tabla N.º 28 y 29).

Tabla 28

Resultados de profundidad de penetración del agua a 28 y 56 días con 5% de adición de Microsílice.

Profundidad de penetración del agua cm												
Microsílice 5%												
Edades	28 días						56 días					
Muestra N°	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
0.40	0.79	0.87	0.46	0.96	0.58	0.96	0.60	0.69	0.72	0.91	0.68	0.70
0.45	0.61	0.94	0.87	0.76	0.96	0.78	0.63	0.89	0.71	0.79	0.65	0.70
0.50	0.95	0.91	0.89	0.86	0.84	0.97	0.77	0.85	0.76	0.87	0.80	0.78
0.55	0.89	0.95	1.21	1.34	1.26	1.07	1.01	1.05	0.98	1.03	0.95	0.90
0.60	1.05	1.10	1.37	1.17	0.98	1.37	0.92	0.90	1.04	1.00	0.99	1.01

Nota: Elaboración propia.

Tabla 29

Resultados de profundidad de penetración del agua a 28 y 56 días con 10% de adición de Microsílice

Profundidad de penetración del agua cm												
Microsílice 10%												
Edades	28 días						56 días					
Muestra N°	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
0.40	0.79	0.87	0.46	0.96	0.58	0.96	0.64	0.60	0.69	0.72	0.91	0.86
0.45	0.61	0.94	0.87	0.76	0.96	0.78	0.63	0.89	0.71	0.74	0.66	0.79
0.50	0.95	0.91	0.89	0.86	0.84	0.97	0.77	0.85	0.76	0.78	0.80	0.87
0.55	0.89	0.95	1.21	1.34	1.26	1.07	1.05	1.02	0.98	0.96	1.03	0.80
0.60	0.92	0.93	0.98	0.87	0.86	1.07	0.93	0.99	0.82	0.95	0.78	0.88

Nota: Elaboración propia.

Obsérvese que las menores profundidades de humedecimiento se encontraron en las muestras con relaciones de a/c = 0.40; edad de curado 56 días y con adición del 10% de Microsílice.

Resultados de Profundidad de penetración de agua bajo presión en el concreto con adición de Puzolana

Se presentan noventa y seis resultados obtenidos a edades de 28 y 56 días, para concretos con 10%, 15% y 20% de adición de Puzolana (Tabla N.º 30, 31 y 32).

Tabla 30

Resultados de profundidad de penetración del agua a 28 y 56 días con 10% de adición de Puzolana

Profundidad de penetración del agua (cm)								
Puzolana= 10%								
Edades	28 días				56 días			
Muestra N°	1	2	3	4	1	2	3	4
0.40	0.89	0.94	0.95	0.97	0.84	0.78	0.66	0.72
0.45	1.31	1.26	1.11	1.68	1.13	0.95	1.08	0.83
0.50	1.25	1.50	1.42	1.30	1.00	1.09	0.96	1.16
0.55	1.81	1.60	1.39	1.54	1.49	1.37	1.02	1.22

Nota: Elaboración propia.

Tabla 31

Resultados de profundidad de penetración del agua a 28 y 56 días con 15% de adición de Puzolana natural de UNACEM.

Profundidad de penetración del agua (cm)								
Puzolana= 15%								
Edades	28 días				56 días			
Muestra N°	1	2	3	4	1	2	3	4
0.40	0.95	0.98	0.89	0.86	0.79	0.79	0.73	0.78
0.45	0.98	0.91	0.93	0.88	1.11	1.25	0.91	0.99
0.50	1.02	1.12	0.99	1.02	0.94	0.92	0.91	0.89
0.55	1.11	1.12	1.20	1.22	1.33	1.35	1.21	1.36

Nota: Elaboración propia.

Tabla 32

Resultados de profundidad de penetración del agua a 28 y 56 días con 20% de adición de Puzolana

Profundidad de penetración del agua (cm)								
Puzolana= 20%								
Edades	28 días				56 días			
Muestra N°	1	2	3	4	1	2	3	4
0.40	0.82	0.79	0.79	0.74	0.72	0.88	0.89	0.93
0.45	0.88	0.81	0.83	0.88	1.01	0.88	1.08	0.92

0.50	0.92	0.94	0.93	0.98	1.19	1.06	1.06	1.07
0.55	1.02	1.10	1.12	1.23	1.54	1.46	1.58	1.49

Nota: Elaboración propia.

Obsérvese que las mayores profundidades húmedas se encontraron para $a/c=0.55$ y edad de 56 días e igual a 1.584 cm; mientras que las menores corresponden a $a/c= 0.40$ y edad de 28 días; asimismo se observa que para 20 % de adición de puzolana los resultados tanto a 28 como 56 son muy similares.

Resultados de Profundidad de penetración de agua bajo presión en el concreto sin adición (muestras de control)

Tabla 33

Resultados de profundidad de penetración del agua a 28 y 56 días, concreto sin adición

Profundidad de penetración del agua (cm)												
Edades	28 días						56 días					
Muestra	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
0.4	4.12	4.18	3.98	4.01	4.3	3.98	2.22	2.31	2.33	2.41	2.28	2.38
0.45	4.41	4.5	4.66	4.82	4.77	4.61	2.56	2.75	2.49	2.52	2.66	2.48
0.5	5.55	5.64	5.44	5.38	5.64	5.48	2.88	2.91	2.95	2.99	3.04	2.75
0.55	6.51	6.54	6.43	6.5	6.26	6.53	3.18	3.38	3.46	3.55	3.42	3.57

Nota: Elaboración propia.

Determinación del contenido de vacíos permeables (astm c642)

Contenido de Vacíos permeables en las mezclas con adición de Metacaolín

Se presentan cuarenta resultados de determinación del porcentaje de vacíos también conocidos como porosidad; evaluados en muestras curadas durante 28 y 56 días con 10 y 15% de adición de Metacaolín (Tabla N.º 34).

Tabla 34

Resultados obtenidos del contenido de vacíos-adición metacaolin

Edades	Contenido de vacíos %							
	Metacaolín=10%				Metacaolín =15%			
	28 días		56 días		28 días		56 días	
Muestra N°	1	2	1	2	1	2	1	2
0.40	10.20	9.40	10.10	9.00	9.40	9.10	9.30	8.90
0.45	10.30	10.50	10.20	10.10	9.60	9.30	9.60	9.20
0.50	10.80	10.30	10.50	10.10	9.90	10.30	9.80	10.10
0.55	11.60	11.10	10.80	10.80	10.20	10.60	10.10	10.20
0.60	11.20	11.70	11.30	10.80	10.90	10.60	10.90	10.60

Nota: Elaboración propia.

Obsérvese que en todos los casos al disminuir la relación a/c, los porcentajes de vacíos disminuyen y que de igual forma al aumentar el porcentaje de adición de Metacaolín en todos los casos disminuyen los vacíos, es decir se va notando la influencia del Metacaolín en la disminución de los vacíos

Contenido de Vacíos permeables en las mezclas con adición de Microsílice

Se presentan cuarenta resultados correspondientes al porcentaje de vacíos evaluados a los 28 y 56 días con 5 y 10% de Microsílice adición (Tabla N.º 35).

Tabla 35

Resultados obtenidos del contenido de vacíos – adición Microsílice

Edades	Contenido de vacíos %							
	Microsílice 5%				Microsílice 10%			
	28 días		56 días		28 días		56 días	
Muestra N°	1	2	1	2	1	2	1	2
0.40	6.70	6.40	6.60	7.00	6.30	6.60	6.00	6.20
0.45	8.70	8,80	8.90	8.60	8.30	8.50	8.10	8.30
0.50	10.80	10.70	10.90	10.70	9.70	9,80	9.90	9.60
0.55	10.90	10.80	11.00	10.90	10.10	10.00	10.30	10.10
0.60	11.40	11.60	11.20	11.40	10.90	11.20	10.60	10.80

Nota: Elaboración propia.

Obsérvese que en todos los casos al disminuir la relación a/c, los porcentajes de vacíos disminuyen y que de igual forma al aumentar el porcentaje de adición de Microsílice en todos los casos disminuyen los vacíos, es decir se va notando la influencia del Microsílice en la disminución de los vacíos.

Contenido de Vacíos permeables en las mezclas con adición de Puzolana

El contenido de vacíos o porosidad determinados en los concretos con adición de puzolana natural de UNACEM; fueron evaluados en setenta y dos muestras cilíndricas.

Las edades consideradas para los ensayos fueron de 28 y 56 días con diferentes contenidos de a/c y diferentes contenidos de puzolana: 10, 15 y 20% .

Los valores obtenidos se presentan en la tabla Tabla N.º 36.

Tabla 36

Resultados obtenidos del contenido de vacíos – adición de Puzolana

Contenido de vacíos %						
Puzolana 10%						
Edades	28 días			56 días		
Muestra N°	1	2	3	1	2	3
0.4	9.78	10.1	9.9	8.64	8.7	8.6
0.45	10.8	10.5	10.8	9.25	9.3	9.2
0.5	11.1	11.4	11.8	10.1	10.2	10
0.55	12.3	12	12.4	10.8	11	10.6
Puzolana 15%						
Edades	28 días			56 días		
Muestra N°	1	2	3	1	2	3
0.4	9.8	9.9	9.7	8.6	8.8	8.4
0.45	10.4	10.3	10	9.12	9.2	9.04
0.5	11	10.9	10.8	10.3	10.3	10.2
0.55	11.9	11.7	11.8	10.4	10.4	10.4
Puzolana 20%						
Edades	28 días			56 días		
Muestra N°	1	2	3	1	2	3
0.4	9.5	9.6	9.1	8.2	8.11	7.99
0.45	9.9	10	9.7	9.2	9	9.1
0.5	10.6	10.4	11.2	10.1	10.1	10.1
0.55	11.6	11.4	11.1	10.6	10.6	10.6

Nota: Elaboración propia.

Obsérvese que en todos los casos al disminuir la relación a/c, los porcentajes de vacíos disminuyen y que de igual forma al aumentar el porcentaje de adición de Puzolana en todos los casos disminuyen los vacíos, es decir se va notando la influencia de la puzolana en la disminución de los vacíos.

Contenido de Vacíos permeables en las mezclas sin adición (muestras de control)

Se presentan 48 resultados de determinación del % de vacíos en muestras de concreto sin adiciones y curadas en 28 y 56 días (Tabla N.º 37)

Tabla 37

Resultados obtenidos del contenido de vacíos en concreto sin adición

Edades	28 días						56 días						
	Muestra	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
Nº													
0.4	10.1	9.8	9.7	10.2	10	9.8	9.8	9.6	10.1	9.9	9.82	9.65	
0.45	10.6	10.7	10.2	10.4	10.5	10.7	10.2	10.5	10.1	10.1	10.4	10.2	
0.5	11.8	11.6	11.8	12.3	12.4	11.7	10.7	10.9	11.2	11.8	11.9	12	
0.55	12.4	12.9	13.1	13	12.8	12.7	11.9	11.7	12	12.2	12.4	12.3	

Nota: Elaboración propia.

Determinación del coeficiente de permeabilidad ntc 4483 y une-en 12390-8

Para la determinación del coeficiente de permeabilidad se aplicó la norma NTC 44833 y se determinó aplicando la siguiente ecuación (previamente en 5.1 y 5.2 se determinaron los valores de profundidad de penetración y contenido de vacíos permeables):

$$K = \frac{D^2 v}{2Th}$$

Donde:

K : Coeficiente de permeabilidad (m/s)

D : Profundidad de penetración del agua (m)

v : Contenido de vacíos determinada mediante la norma ASTM C642

T : Tiempo para penetrar la profundidad D (s)

h : Presión del agua (m)

Determinación de los Coeficientes de permeabilidad del concreto con adición de Metacaolín

Se presentan los resultados de permeabilidad determinados en 96 muestras de concreto con adición de Metacaolín y curadas durante 28 y 56 días; con 10% y 15% de adición (Tabla N.º 38 y 39).

Tabla 38

Coefficientes de permeabilidad del concreto con adición de Metacaolín 10%

	A/C	Adición (%)	Edad días	K (10^{-12} m/s)	Edad días	K (10^{-12} m/s)
1	0.40	10	28	0.3940	56	0.0120
2	0.40	10	28	0.4140	56	0.5330
3	0.40	10	28	0.5150	56	0.5950
4	0.40	10	28	0.5690	56	0.6030
5	0.40	10	28	0.8240	56	0.8100
6	0.40	10	28	1.3500	56	0.0120
7	0.45	10	28	0.7070	56	0.5510
8	0.45	10	28	0.8580	56	0.6470
9	0.45	10	28	0.8880	56	0.6900
10	0.45	10	28	0.9090	56	0.8250
11	0.45	10	28	0.8580	56	0.8350
12	0.45	10	28	0.9090	56	0.9520
13	0.50	10	28	0.9120	56	0.9170
14	0.50	10	28	1.5100	56	0.9590
15	0.50	10	28	1.7900	56	1.0800
16	0.50	10	28	8.5000	56	1.1600
17	0.50	10	28	0.9090	56	1.2900
18	0.50	10	28	1.5100	56	1.3400
19	0.55	10	28	2.1100	56	1.3800
20	0.55	10	28	2.4800	56	1.6600
21	0.55	10	28	2.8300	56	1.9900
22	0.55	10	28	3.3800	56	2.2200
23	0.55	10	28	3.6300	56	2.3100
24	0.55	10	28	2.8300	56	1.3800

Nota: Elaboración propia.

Tabla 39

Coefficientes de permeabilidad del concreto con adición de Metacaolín 15%

	A/C	Adición (%)	Edad días	K (10 ⁻¹² m/s)	Edad días	K (10 ⁻¹² m/s)
1	0.40	15	28	0.0420	56	0.0200
2	0.40	15	28	0.1140	56	0.0340
3	0.40	15	28	0.1350	56	0.0730
4	0.40	15	28	0.1550	56	0.0840
5	0.40	15	28	0.1840	56	0.0990
6	0.40	15	28	0.3460	56	0.0730
7	0.45	15	28	0.0740	56	0.0700
8	0.45	15	28	0.1080	56	0.1240
9	0.45	15	28	0.1770	56	0.1510
10	0.45	15	28	0.2320	56	0.1890
11	0.45	15	28	0.2530	56	0.2170
12	0.45	15	28	0.3010	56	0.1500
13	0.50	15	28	0.0960	56	0.1480
14	0.50	15	28	0.2140	56	0.2140
15	0.50	15	28	0.2760	56	0.2240
16	0.50	15	28	0.2930	56	0.2440
17	0.50	15	28	0.4310	56	0.2540
18	0.50	15	28	0.2760	56	0.3210
19	0.55	15	28	0.2490	56	0.1940
20	0.55	15	28	0.2690	56	0.2080
21	0.55	15	28	0.2690	56	0.2230
22	0.55	15	28	0.3390	56	0.2490
23	0.55	15	28	0.7510	56	0.3000
24	0.55	15	28	0.2680	56	0.3060

Nota: Elaboración propia.

En todos los casos el coeficiente de permeabilidad disminuyó por la presencia del metacaolín, asimismo se observa que después de 28 días de curado sigue disminuyendo la permeabilidad por reacciones químicas entre la sílice activa del metacaolín, los hidróxidos de calcio libre y presencia de humedad; mayores contenidos de adiciones de Metacaolín y menores relaciones a/c, reducen la permeabilidad en todos los casos por el Metacaolín .

– Determinación de los Coeficientes de permeabilidad con Microsílice

En las Tablas N.º 40 y N.º 41, se presentan los coeficientes de permeabilidad determinados en 106 muestras de concreto con adición de 5% y 10% de microsílice, determinados a los 28 y 56 días de curado (Tabla N.º 40 y 41).

Tabla 40

Coefficientes de permeabilidad del concreto con adición de Microsílice 5%

N°	A/C	Adición (%)	Edad días	K (10 ⁻¹² m/s)	Edad días	K (10 ⁻¹² m/s)
1	0.4	5	28	0.218	56	0.229
2	0.4	5	28	0.288	56	0.247
3	0.4	5	28	0.321	56	0.251
4	0.4	5	28	0.321	56	0.281
5	0.4	5	28	0.346	56	0.329
6	0.4	5	28	0.288	56	0.247
7	0.45	5	28	0.315	56	0.304
8	0.45	5	28	0.361	56	0.344
9	0.45	5	28	0.392	56	0.404
10	0.45	5	28	0.491	56	0.463
11	0.45	5	28	0.505	56	0.512
12	0.45	5	28	0.392	56	0.526
13	0.5	5	28	0.441	56	0.13
14	0.5	5	28	0.479	56	0.464
15	0.5	5	28	0.526	56	0.519
16	0.5	5	28	0.534	56	0.605
17	0.5	5	28	0.644	56	0.669
18	0.5	5	28	0.708	56	0.526
19	0.55	5	28	0.564	56	0.46
20	0.55	5	28	0.564	56	0.49
21	0.55	5	28	0.606	56	0.514
22	0.55	5	28	0.632	56	0.543
23	0.55	5	28	0.696	56	0.629
24	0.55	5	28	0.705	56	0.46

Nota: elaboración propia.

Tabla 41

Coefficientes de permeabilidad del concreto con adición de Microsílice 10%

N°	A/C	Adición (%)	Edad días	K (10 ⁻¹² m/s)	Edad días	K (10 ⁻¹² m/s)
1	0.4	10	28	0.06	56	0.015
2	0.4	10	28	0.112	56	0.064
3	0.4	10	28	0.135	56	0.085
4	0.4	10	28	0.165	56	0.093
5	0.4	10	28	0.165	56	0.085

6	0.4	10	28	0.135	56	0.078
7	0.45	10	28	0.088	56	0.094
8	0.45	10	28	0.136	56	0.147
9	0.45	10	28	0.143	56	0.187
10	0.45	10	28	0.178	56	0.146
11	0.45	10	28	0.208	56	0.186
12	0.45	10	28	0.217	56	0.145
13	0.5	10	28	0.194	56	0.159
14	0.5	10	28	0.204	56	0.163
15	0.5	10	28	0.218	56	0.199
16	0.5	10	28	0.228	56	0.208
17	0.5	10	28	0.248	56	0.163
18	0.5	10	28	0.228	56	0.199
19	0.55	10	28	0.259	56	0.046
20	0.55	10	28	0.328	56	0.275
21	0.55	10	28	0.42	56	0.304
22	0.55	10	28	0.455	56	0.316
23	0.55	10	28	0.515	56	0.275
24	0.55	10	28	0.42	56	0.34
25	0.6	10	28	0.297	56	0.057
26	0.6	10	28	0.341	56	0.316
27	0.6	10	28	0.374	56	0.335
28	0.6	10	28	0.423	56	0.057
29	0.6	10	28	0.581	56	0.34

Nota: elaboración propia.

– Determinación de los Coeficientes de permeabilidad con Puzolanas

En las Tablas N.º 42 y N.º43; Se presentan los resultados de 96 muestras de concreto con adición de; 10%, 15% y 20% de puzolana curadas a 28 y 56 días; correspondientes al coeficiente de permeabilidad.

Tabla 42

Coefficientes de permeabilidad del concreto con Puzolana 10% a 28 y 56 días

Nº	A/C	Adición (%)	Edad días	K (10 ⁻¹² m/s)	Edad días	K (10 ⁻¹² m/s)
1	0.4	10	28	0.229	56	0.108
2	0.4	10	28	0.246	56	0.174
3	0.4	10	28	0.337	56	0.207

4	0.4	10	28	0.248	56	0.297
5	0.45	10	28	0.372	56	0.181
6	0.45	10	28	0.477	56	0.238
7	0.45	10	28	0.517	56	0.304
8	0.45	10	28	0.651	56	0.296
9	0.5	10	28	0.481	56	0.288
10	0.5	10	28	0.519	56	0.343
11	0.5	10	28	0.62	56	0.385
12	0.5	10	28	0.686	56	0.343
13	0.55	10	28	0.616	56	0.587
14	0.55	10	28	0.75	56	0.65
15	0.55	10	28	0.807	56	0.675
16	0.55	10	28	1.035	56	1.013

Nota: elaboración propia.

El mayor valor obtenido de permeabilidad fue de 1.035×10^{-12} m/s; correspondiente a los 28 días de curado húmedo y para la relación $a/c=0.55$; con 10 % de adición de puzolana; mientras que el menor valor observado de permeabilidad fue de 0.1080×10^{-12} m/s; correspondiente a los 56 días de curado húmedo y para la relación $a/c = 0.40$.

También se puede observar que después de los 28 días y hasta los 56 días el coeficiente de permeabilidad sigue disminuyendo debido a las reacciones químicas que se siguen dando entre la sílice que aporta la puzolana, el hidróxido de calcio libre del cemento y la humedad del agua.

Este comportamiento de reacciones químicas a largo plazo es típico de las adiciones ultrafinas por su finura y alta superficie específica su proceso de reacción se sigue dando aun después de los 28 días.

Tabla 43

Coefficientes de permeabilidad del concreto con puzolana 15% a 28 y 56 días

	A/C	Adición (%)	Edad días	K (10^{-12} m/s)	Edad días	K (10^{-12} m/s)
1	0.4	15	28	0.219	56	0.13
2	0.4	15	28	0.281	56	0.135

3	0.4	15	28	0.289	56	0.148
4	0.4	15	28	0.28	56	0.132
5	0.45	15	28	0.277	56	0.172
6	0.45	15	28	0.422	56	0.205
7	0.45	15	28	0.529	56	0.205
8	0.45	15	28	0.421	56	0.324
9	0.5	15	28	0.347	56	0.23
10	0.5	15	28	0.453	56	0.244
11	0.5	15	28	0.48	56	0.247
12	0.5	15	28	0.661	56	0.232
13	0.55	15	28	0.598	56	0.445
14	0.55	15	28	0.626	56	0.54
15	0.55	15	28	0.819	56	0.544
16	0.55	15	28	0.906	56	0.449

Nota: elaboración propia.

El mayor valor obtenido de permeabilidad fue de 0.8190×10^{-12} m/s; correspondiente a los 28 días de curado húmedo y para la relación a/c=0.55; con 15 % de adición de puzolana; mientras que el menor valor observado de permeabilidad fue de 0.13×10^{-12} m/s; correspondiente a los 56 días de curado húmedo y para la relación a/c = 0.40.

También se puede observar que después de los 28 días y hasta los 56 días el coeficiente de permeabilidad sigue disminuyendo debido a las reacciones químicas que se siguen dando entre la sílice que aporta la puzolana, el hidróxido de calcio libre del cemento y la humedad del agua. Se observan valores menores de permeabilidad a 56 días en todos los casos esto debido a la mayor cantidad de puzolana. Se observa el efecto de los mayores contenidos de puzolana en la reducción de los coeficientes de permeabilidad (Tabla N.º 44).

Tabla 44

Coefficientes de permeabilidad del concreto con puzolana 20 % a 28 y 56 días

	A/C	Adición (%)	Edad días	K (10 ⁻¹² m/s)	Edad días	K (10 ⁻¹² m/s)
1	0.4	20	28	0.223	56	0.076
2	0.4	20	28	0.278	56	0.107
3	0.4	20	28	0.297	56	0.117

4	0.4	20	28	0.347	56	0.122
5	0.45	20	28	0.378	56	0.202
6	0.45	20	28	0.399	56	0.216
7	0.45	20	28	0.427	56	0.261
8	0.45	20	28	0.379	56	0.301
9	0.5	20	28	0.511	56	0.322
10	0.5	20	28	0.845	56	0.322
11	0.5	20	28	1.196	56	0.33
12	0.5	20	28	0.51	56	0.406
13	0.55	20	28	0.867	56	0.642
14	0.55	20	28	0.94	56	0.673
15	0.55	20	28	1.052	56	0.756
16	0.55	20	28	1.088	56	0.675

Nota: elaboración propia.

Algo similar se observa en la tabla 44; para las mismas relaciones a/c y contenidos de puzolanas, las permeabilidades después de 28 días siguen disminuyendo; no obstante, si comparamos estos valores (20% de puzolana), con los obtenidos en la tabla 43 (15% de puzolana); se nota que el efecto del contenido de adición en la permeabilidad es menor; por lo que se puede decir que los mejores resultados se alcanzaron con la adición de 15% de puzolana, a los 56 días y que adicionar 20 % de puzolana causa un efecto mínimo en la permeabilidad comparativo con el 15% de puzolana.

– **Determinación de los Coeficientes de permeabilidad en el concreto sin adiciones**

En las tablas N°45 y N°46, se muestran los coeficientes de permeabilidad determinados en el concreto sin adiciones minerales, a edades de 28 y 56 días, de curado húmedo para las relaciones a/c de 0.40, 0.45, 0.50, 0.55 y 0.60.

Tabla 45

Resultados del coeficiente de permeabilidad con diseños de mezcla concreto simple a 28 días

Edad	Coeficientes de Permeabilidad X 10^{-11} m/seg					
	28 días					
Muestra N°	1	2	3	4	5	6
0.40	2.31	2.09	2.96	2.42	3.03	2.21
0.45	3.89	4.14	5.69	6.00	5,15	10.70

0.50	9.21	8.50	12.60	11.50	13.00	10.70
0.55	18.10	16.10	15.10	29.50	18.70	26.10
0.60	34.80	32.50	26.00	19.30	28.60	24.00

Nota: elaboración propia.

Tabla 46

Resultados del coeficiente de permeabilidad con diseños de mezcla concreto simple a 56 días

Edad (días)	Coeficientes de Permeabilidad X 10^{-11} m/seg					
	56					
Muestra N°	1	2	3	4	5	6
0.40	1.91	1.92	1.96	2.12	2.03	2.01
0.45	3.70	3.94	4.69	4.34	5,15	4.75
0.50	8.90	8.30	11.60	11.00	12.00	12.70
0.55	17.10	16.10	14.30	14.50	13.70	13.10
0.60	29.80	30.50	26.00	21.30	25.60	23.00

Obsérvese que en los concretos sin adición los rangos de permeabilidad van desde 1.91×10^{-11} , hasta 34.8×10^{-11} m/seg; son valores de permeabilidad altos comparativamente a los obtenidos en todos los casos anteriores en los concretos con adiciones, se observa entonces la influencia de todas las adiciones utilizadas en la permeabilidad.

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Analisis del coeficiente de permeabilidad del concreto sin adicion:

En la siguiente tabla N°47; se presentan 124 datos del concreto patrón o de control, considerados para la evaluación de los resultados de permeabilidad en el concreto sin adición o concreto de control; se consignan también las variables de fabricación tales como: cemento, agua, arena, piedra, aditivo, edad; que serán consideradas para el análisis de correlación múltiple lineal, del conjunto de datos ;para las diferentes relaciones a/c y edades ; se obtuvo información valiosa de cuáles son las variables de fabricación que tienen mayor incidencia en los valores de la permeabilidad .

Tabla 47

Variables de fabricación, edad, permeabilidad del concreto patrón

	A/C	Adición (%)	Cemento kg	Adición kg	Agua kg	Arena kg	Piedra kg	Aditivo kg	Edad (días)	Permeabilidad (10^{-12} m/s)
1	0.40	0	360.00	0.00	144.0	918.50	1002.5	5.40	28	2.0900
2	0.40	0	360.00	0.00	144.0	918.50	1002.5	5.40	28	2.2100
3	0.40	0	360.00	0.00	144.0	918.50	1002.5	5.40	28	2.3100
4	0.40	0	360.00	0.00	144.0	918.50	1002.5	5.40	28	2.4200
5	0.40	0	360.00	0.00	144.0	918.50	1002.5	5.40	28	3.0300
6	0.45	0	360.00	0.00	162.0	895.50	977.40	5.40	28	3.9000
7	0.45	0	360.00	0.00	162.0	895.50	977.40	5.40	28	4.1600
8	0.45	0	380.00	0.00	171.0	1001.0	826.00	7.60	28	4.4500
9	0.45	0	380.00	0.00	171.0	1001.0	826.00	7.60	28	4.9200
10	0.45	0	360.00	0.00	162.0	895.50	977.40	5.40	28	5.1700
11	0.45	0	360.00	0.00	162.0	895.50	977.40	5.40	28	5.7200
12	0.45	0	380.00	0.00	171.0	1001.0	826.00	7.60	28	5.7500
13	0.45	0	360.00	0.00	162.0	895.50	977.40	5.40	28	6.0300
14	0.45	0	380.00	0.00	171.0	1001.0	826.00	7.60	28	6.0600
15	0.45	0	380.00	0.00	171.0	1001.0	826.00	7.60	28	6.6000
16	0.45	0	360.00	0.00	162.0	895.50	977.40	5.40	28	10.7200
17	0.45	0	380.00	0.00	171.0	1001.0	826.00	7.60	49	1.7600
18	0.45	0	380.00	0.00	171.0	1001.0	826.00	7.60	49	1.7800
19	0.45	0	380.00	0.00	171.0	1001.0	826.00	7.60	49	1.8300
20	0.45	0	380.00	0.00	171.0	1001.0	826.00	7.60	49	1.8700
21	0.45	0	380.00	0.00	171.0	1001.0	826.00	7.60	49	2.5700
22	0.45	0	360.00	0.00	162.0	895.50	977.40	5.40	56	1.7500
23	0.45	0	360.00	0.00	162.0	895.50	977.40	5.40	56	1.8600

24	0.45	0	360.00	0.00	162.0	895.50	977.40	5.40	56	1.8800
25	0.45	0	360.00	0.00	162.0	895.50	977.40	5.40	56	2.7100
26	0.45	0	360.00	0.00	162.0	895.50	977.40	5.40	56	2.7200
27	0.45	0	380.00	0.00	171.0	1001.0	826.00	7.60	70	0.5940
28	0.45	0	380.00	0.00	171.0	1001.0	826.00	7.60	70	0.8900
29	0.45	0	380.00	0.00	171.0	1001.0	826.00	7.60	70	1.0300
30	0.45	0	380.00	0.00	171.0	1001.0	826.00	7.60	70	1.7800
31	0.45	0	380.00	0.00	171.0	1001.0	826.00	7.60	70	5.9000
32	0.45	0	380.00	0.00	171.0	1001.0	826.00	7.60	91	0.5830
33	0.45	0	380.00	0.00	171.0	1001.0	826.00	7.60	91	0.6140
34	0.45	0	380.00	0.00	171.0	1001.0	826.00	7.60	91	0.8470
35	0.45	0	380.00	0.00	171.0	1001.0	826.00	7.60	91	0.8840
36	0.45	0	380.00	0.00	171.0	1001.0	826.00	7.60	91	0.9460
37	0.45	0	360.00	0.00	162.0	895.50	977.40	5.40	100	0.2360
38	0.45	0	360.00	0.00	162.0	895.50	977.40	5.40	100	0.2610
39	0.45	0	360.00	0.00	162.0	895.50	977.40	5.40	100	0.5220
40	0.45	0	360.00	0.00	162.0	895.50	977.40	5.40	100	1.1000
41	0.45	0	360.00	0.00	162.0	895.50	977.40	5.40	100	1.1400
42	0.45	0	380.00	0.00	171.0	1001.0	826.00	7.60	112	0.4560
43	0.45	0	380.00	0.00	171.0	1001.0	826.00	7.60	112	0.4820
44	0.45	0	380.00	0.00	171.0	1001.0	826.00	7.60	112	0.7160
45	0.45	0	380.00	0.00	171.0	1001.0	826.00	7.60	112	0.7350
46	0.45	0	380.00	0.00	171.0	1001.0	826.00	7.60	112	1.3500
47	0.50	0	320.00	0.00	160.0	915.00	998.70	4.80	28	8.5100
48	0.50	0	320.00	0.00	160.0	915.00	998.70	4.80	28	9.2200
49	0.50	0	320.00	0.00	160.0	915.00	998.70	4.80	28	10.7000
50	0.50	0	320.00	0.00	160.0	915.00	998.70	4.80	28	11.5000
51	0.50	0	320.00	0.00	160.0	915.00	998.70	4.80	28	12.6000
52	0.50	0	320.00	0.00	160.0	915.00	998.70	4.80	28	13.0000
53	0.55	0	300.00	0.00	165.0	917.10	1001.0	4.50	28	16.2000
54	0.55	0	350.00	0.00	193.0	975.00	804.00	6.30	28	16.8000
55	0.55	0	350.00	0.00	193.0	975.00	804.00	6.30	28	17.0000
56	0.55	0	350.00	0.00	193.0	975.00	804.00	6.30	28	17.8000
57	0.55	0	300.00	0.00	165.0	917.10	1001.0	4.50	28	18.2000
58	0.55	0	300.00	0.00	165.0	917.10	1001.0	4.50	28	18.7000
59	0.55	0	350.00	0.00	193.0	975.00	804.00	6.30	28	19.2000
60	0.55	0	300.00	0.00	165.0	917.10	1001.0	4.50	28	26.2000
61	0.55	0	300.00	0.00	165.0	917.10	1001.0	4.50	28	29.6000
62	0.55	0	350.00	0.00	193.0	975.00	804.00	6.30	28	35.4000
63	0.55	0	350.00	0.00	193.0	975.00	804.00	6.30	28	73.3000
64	0.55	0	350.00	0.00	193.0	975.00	804.00	6.30	49	4.0100
65	0.55	0	350.00	0.00	193.0	975.00	804.00	6.30	49	4.4000
66	0.55	0	350.00	0.00	193.0	975.00	804.00	6.30	49	4.6900
67	0.55	0	350.00	0.00	193.0	975.00	804.00	6.30	49	4.9300
68	0.55	0	350.00	0.00	193.0	975.00	804.00	6.30	49	5.1100
69	0.55	0	300.00	0.00	165.0	917.10	1001.0	4.50	56	2.6980
70	0.55	0	300.00	0.00	165.0	917.10	1001.0	4.50	56	3.2400
71	0.55	0	300.00	0.00	165.0	917.10	1001.0	4.50	56	3.3200
72	0.55	0	300.00	0.00	165.0	917.10	1001.0	4.50	56	3.4000
73	0.55	0	300.00	0.00	165.0	917.10	1001.0	4.50	56	3.4800

74	0.55	0	300.00	0.00	165.0	917.10	1001.0	4.50	56	3.6100
75	0.55	0	350.00	0.00	193.0	975.00	804.00	6.30	70	3.1100
76	0.55	0	350.00	0.00	193.0	975.00	804.00	6.30	70	3.2600
77	0.55	0	350.00	0.00	193.0	975.00	804.00	6.30	70	3.5400
78	0.55	0	350.00	0.00	193.0	975.00	804.00	6.30	70	3.8800
79	0.55	0	350.00	0.00	193.0	975.00	804.00	6.30	70	4.5400
80	0.55	0	350.00	0.00	193.0	975.00	804.00	6.30	91	2.6000
81	0.55	0	350.00	0.00	193.0	975.00	804.00	6.30	91	3.0500
82	0.55	0	350.00	0.00	193.0	975.00	804.00	6.30	91	3.0700
83	0.55	0	350.00	0.00	193.0	975.00	804.00	6.30	91	3.3200
84	0.55	0	350.00	0.00	193.0	975.00	804.00	6.30	91	5.2300
85	0.55	0	300.00	0.00	165.0	917.10	1001.0	4.50	100	1.7800
86	0.55	0	300.00	0.00	165.0	917.10	1001.0	4.50	100	1.7900
87	0.55	0	300.00	0.00	165.0	917.10	1001.0	4.50	100	2.0600
88	0.55	0	300.00	0.00	165.0	917.10	1001.0	4.50	100	2.1200
89	0.55	0	300.00	0.00	165.0	917.10	1001.0	4.50	100	4.2600
90	0.55	0	350.00	0.00	193.0	975.00	804.00	6.30	112	2.3200
91	0.55	0	350.00	0.00	193.0	975.00	804.00	6.30	112	2.5500
92	0.55	0	350.00	0.00	193.0	975.00	804.00	6.30	112	2.7700
93	0.55	0	350.00	0.00	193.0	975.00	804.00	6.30	112	2.9600
94	0.55	0	350.00	0.00	193.0	975.00	804.00	6.30	112	3.6400
95	0.60	0	280.00	0.00	168.0	921.80	1006.0	4.20	28	19.3000
96	0.60	0	280.00	0.00	168.0	921.80	1006.0	4.20	28	24.0000
97	0.60	0	280.00	0.00	168.0	921.80	1006.0	4.20	28	26.0000
98	0.60	0	280.00	0.00	168.0	921.80	1006.0	4.20	28	32.4000
99	0.60	0	280.00	0.00	168.0	921.80	1006.0	4.20	28	34.7000
100	0.65	0	340.00	0.00	208.0	967.00	798.00	5.10	28	38.3000
101	0.65	0	340.00	0.00	208.0	967.00	798.00	5.10	28	42.8000
102	0.65	0	340.00	0.00	208.0	967.00	798.00	5.10	28	53.0000
103	0.65	0	340.00	0.00	208.0	967.00	798.00	5.10	28	56.5000
104	0.65	0	340.00	0.00	208.0	967.00	798.00	5.10	28	58.6000
105	0.65	0	340.00	0.00	208.0	967.00	798.00	5.10	49	14.9000
106	0.65	0	340.00	0.00	208.0	967.00	798.00	5.10	49	19.0000
107	0.65	0	340.00	0.00	208.0	967.00	798.00	5.10	49	23.2000
108	0.65	0	340.00	0.00	208.0	967.00	798.00	5.10	49	27.3000
109	0.65	0	340.00	0.00	208.0	967.00	798.00	5.10	70	19.1000
110	0.65	0	340.00	0.00	208.0	967.00	798.00	5.10	70	20.0000
111	0.65	0	340.00	0.00	208.0	967.00	798.00	5.10	70	20.4000
112	0.65	0	340.00	0.00	208.0	967.00	798.00	5.10	70	20.9000
113	0.65	0	340.00	0.00	208.0	967.00	798.00	5.10	70	21.9000
114	0.65	0	340.00	0.00	208.0	967.00	798.00	5.10	91	10.2000
115	0.65	0	340.00	0.00	208.0	967.00	798.00	5.10	91	11.7000
116	0.65	0	340.00	0.00	208.0	967.00	798.00	5.10	91	14.9000
117	0.65	0	340.00	0.00	208.0	967.00	798.00	5.10	91	16.8000
118	0.65	0	340.00	0.00	208.0	967.00	798.00	5.10	91	22.8000
119	0.65	0	340.00	0.00	208.0	967.00	798.00	5.10	112	9.4500
120	0.65	0	340.00	0.00	208.0	967.00	798.00	5.10	112	12.9000
121	0.65	0	340.00	0.00	208.0	967.00	798.00	5.10	112	13.9000
122	0.65	0	340.00	0.00	208.0	967.00	798.00	5.10	112	14.0000
123	0.65	0	340.00	0.00	208.0	967.00	798.00	5.10	112	14.6000

124	0.65	0	340.00	0.00	208.0	967.00	798.00	5.10	112	25.1000
-----	------	---	--------	------	-------	--------	--------	------	-----	---------

Nota. Resaltado en Amarillo se encuentran los valores atípicos identificados aplicando la prueba de Grubbs.

Análisis de valores atípicos

El análisis de valores atípicos se realizó al conjunto de 124 datos, utilizando el test de Grubbs; para el análisis se consideraron grupos correspondientes a la misma relación agua cemento; por razones prácticas se reportan los grupos donde se identificaron valores atípicos (Tablas N.º 48, 49, 50, 51, 52 y 53; y Figuras N.º 12, 13 y 14).

Tabla 48

Valores estadísticos del concreto patrón para 0.45 (N=41)

Variable	Edad		N	Media	Desv.Est.	Mín.	Máx.	G	P
	(días)								
Permeabilidad (10 ⁻¹² m/s)	28	11	5.771	1.851	3.900	10.720	2.67	0.003	
	49	5	1.962	0.343	1.760	2.570	1.77	0.004	
	56	5	2.184	0.487	1.750	2.720	1.10	1.000	
	70	5	2.039	2.202	0.594	5.900	1.75	0.017	
	91	5	0.7748	0.1651	0.5830	0.9460	1.16	1.000	
	100	5	0.652	0.442	0.236	1.140	1.10	1.000	
	112	5	0.748	0.360	0.456	1.350	1.67	0.101	

Nota: elaboración propia.

Tabla 49

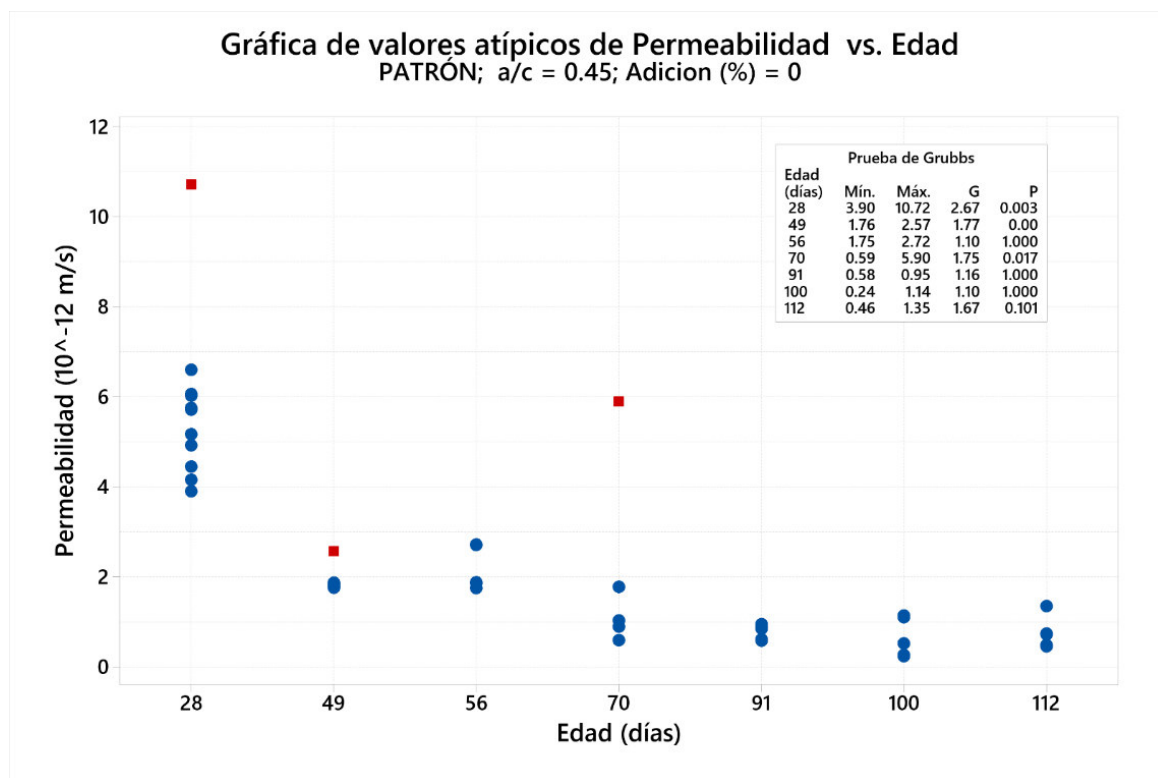
Valores atípicos identificados prueba Grubbs, a/c =0.45

Variable	Edad (días)	Fila	Valor atípico
Permeabilidad (10 ⁻¹² m/s)	28	16	10.72
	49	21	2.57
	70	31	5.90

Nota: elaboración propia.

Figura 12

Valores atípicos de permeabilidad para a/c =0.45, concreto patrón



Nota. Obsérvese en color rojo los tres valores atípicos

Tabla 50

Valores estadísticos del concreto patrón para $a/c = 0,55$, en el concreto patrón ($N=42$)

Variable	Edad							
	(días)	N	Media	Desv.Est.	Mín.	Máx.	G	P
Permeabilidad (10^{-12} m/s)	28	11	26.22	16.81	16.20	73.30	2.80	0.000
	49	5	4.628	0.436	4.010	5.110	1.42	0.552
	56	6	3.291	0.318	2.698	3.610	1.87	0.063
	70	5	3.666	0.570	3.110	4.540	1.53	0.317
	91	5	3.454	1.026	2.600	5.230	1.73	0.035
	100	5	2.402	1.050	1.780	4.260	1.77	0.007
	112	5	2.848	0.503	2.320	3.640	1.57	0.246

Nota: elaboración propia.

Tabla 51

Valores atípicos de permeabilidad-prueba de Grubbs $a/c=0.55$

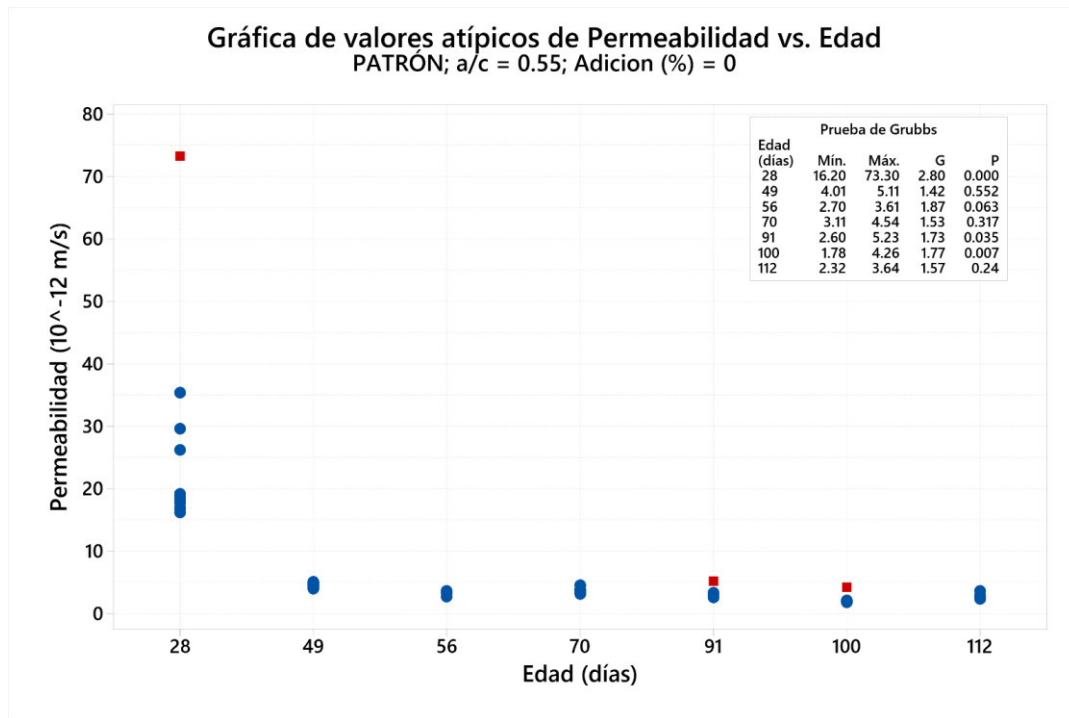
Variable	Edad (días)	Fila	Valor atípico
Permeabilidad (10^{-12} m/s)	28	63	73.30
	91	84	5.23

100	89	4.26
-----	----	------

Nota: elaboración propia.

Figura 13

Valores atípicos de permeabilidad para a/c = 0.55, concreto patrón



Nota: Obsérvese en rojo los 3 valores atípicos identificados

Tabla 52

Valores estadísticos del concreto patrón para a/c = 0,65, en el concreto patrón (N=25)

Variable	Edad							
	(días)	N	Media	Desv.Est.	Mín.	Máx.	G	P
Permeabilidad (10 ⁻¹² m/s)	28	5	49.84	8.86	38.30	58.60	1.30	0.814
	49	4	21.10	5.34	14.90	27.30	1.16	0.907
	70	5	20.460	1.041	19.100	21.900	1.38	0.624
	91	5	15.28	4.94	10.20	22.80	1.52	0.338
	112	6	14.99	5.28	9.45	25.10	1.91	0.035

Nota: elaboración propia.

Tabla 53

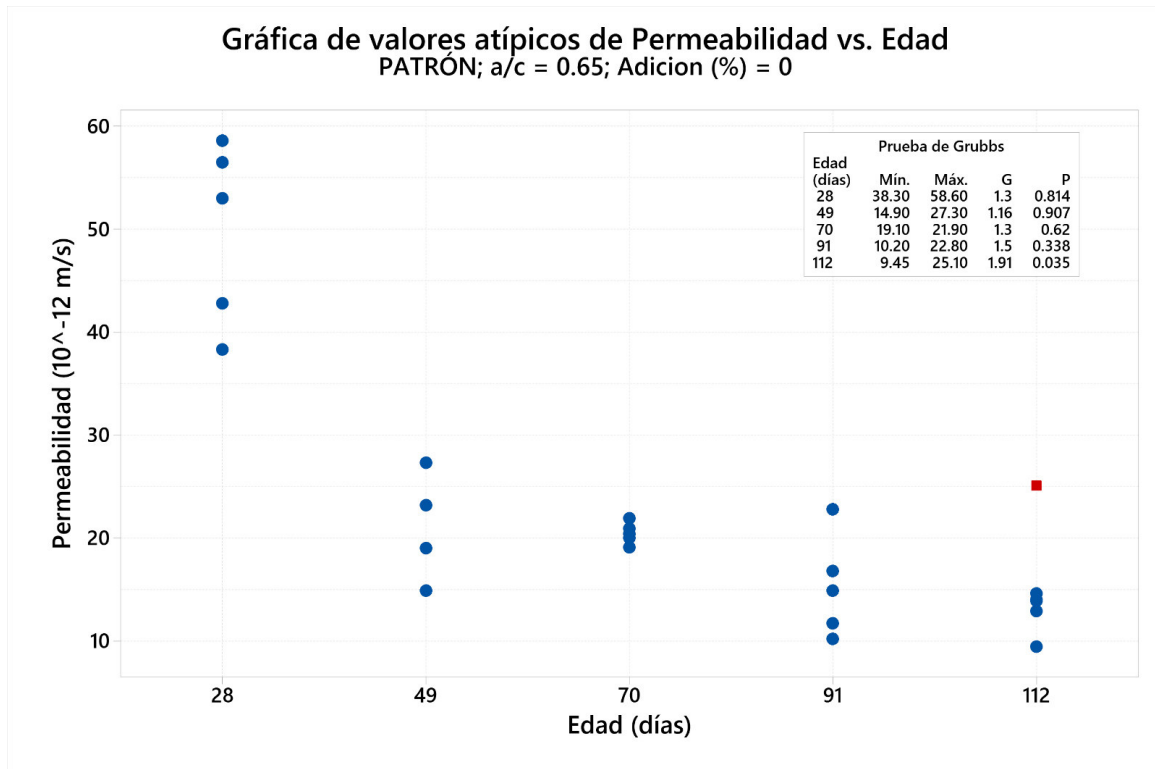
Valores atípicos de permeabilidad-prueba de Grubbs a/c=0.65

Variable	Edad (días)	Fila	Valor atípico
Permeabilidad (10^{-12} m/s)	112	124	25.1

Nota: elaboración propia.

Figura 14

Valores atípicos de permeabilidad para $a/c = 0.65$, concreto patrón



Nota. Se aprecia un valor atípico representado por el cuadrado rojo.

Análisis de regresión múltiple lineal

Mediante el uso del Matlab y utilizando las variables de fabricación presentadas en la Tabla N.º 54, se buscó la ecuación de regresión múltiple lineal (MRL), que mejor se ajustase con la data de permeabilidad, obtenida en forma experimental; previo análisis se encontraron ecuaciones con muy buenos factores de correlación, que permitirán determinar la Permeabilidad (10^{-12} m/s) del concreto a partir de los datos teóricos del diseño de mezcla: Cemento (kg); Agua (kg); Arena (kg); Piedra (kg); Aditivo(kg); Edad (días).

Ecuación de regresión múltiple lineal; se presenta la ecuación que estima los valores del coeficiente de permeabilidad a partir de los datos del: cemento, agua, arena, piedra y edad de curado.

$$\text{Permeabilidad (m/s)} = 1404 + 0.355\text{Cemnto} + 1.840\text{ Agua} + 0.547\text{ Arena} + 0.517\text{ Piedra} - 0.49\text{ Aditivo} - 0.2013\text{ Edad}$$

*Los materiales deben ser ingresados en kg, la edad en días, la permeabilidad $\times 10^{-12}$

Tabla 54

Coefficientes de correlación de Regresión múltiple lineal

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	-1404	328	-4.28	0.000	
Cemento (kg)	0.3555	0.0955	3.72	0.000	17.63
Agua (kg)	1.840	0.440	4.18	0.000	178.78
Arena (kg)	0.547	0.111	4.93	0.000	41.98
Piedra (kg)	0.517	0.136	3.81	0.000	386.21
Aditivo(kg)	-0.49	3.74	-0.13	0.896	42.33
Edad (días)	-0.2013	0.0221	-9.12	0.000	1.20

Nota: elaboración propia.

Tabla 55

Factores de correlación calculados para el modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
6.79005	70.33%	68.72%	66.61%

Nota: elaboración propia.

Se alcanza un factor de correlación de 70.33% para la determinación de la permeabilidad en el concreto patrón. La Tabla N.º 56 muestra el Análisis de varianza.

Tabla 56

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	6	12024.4	2004.07	43.47	0.000
Cemento (kg)	1	638.8	638.77	13.85	0.000
Agua (kg)	1	804.8	804.80	17.46	0.000
Arena (kg)	1	1122.4	1122.36	24.34	0.000
Piedra (kg)	1	670.9	670.92	14.55	0.000
Aditivo(kg)	1	0.8	0.80	0.02	0.896
Edad (días)	1	3834.7	3834.71	83.17	0.000
Error	110	5071.5	46.10		
Falta de ajuste	17	3977.0	233.94	19.88	0.000
Error puro	93	1094.5	11.77		
Total	116	17095.9			

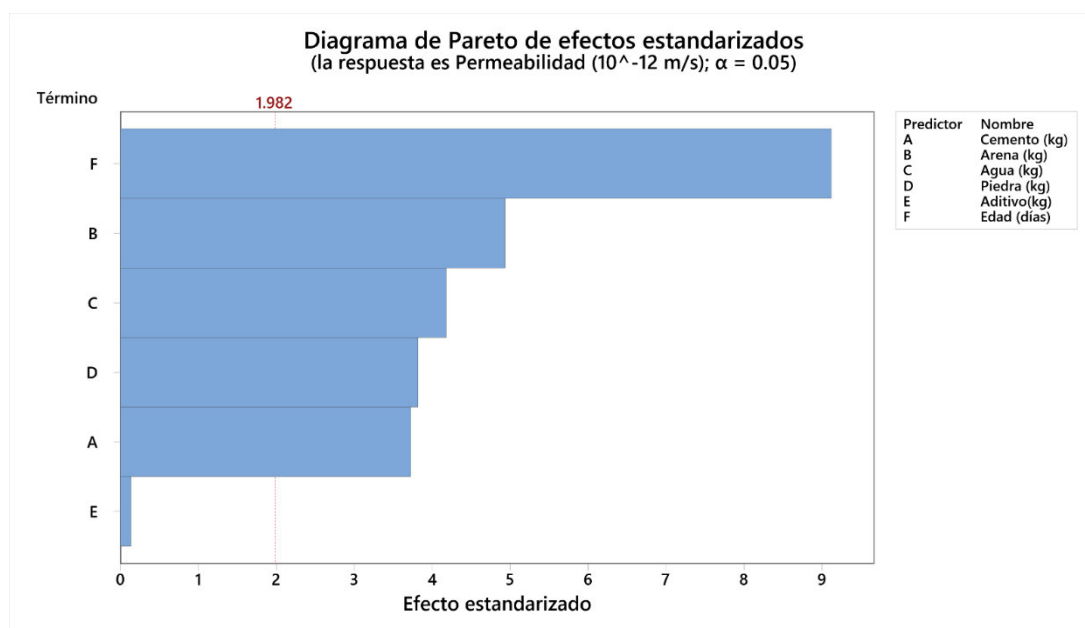
Nota: elaboración propia.

En la fig. 15, se aprecia en forma gráfica, que la edad de curado es un factor muy importante en el coeficiente de permeabilidad y que el aditivo no afecto a la permeabilidad (Figura N.º 15).

Figura 15

Diagrama de Pareto, variables correlacionadas: cemento, arena, agua, piedra, aditivo y edad

Nota: elaboración propia.



Determinación de permeabilidad usando ecuación de regresión múltiple lineal (MLR)

Se presenta a continuación la Tabla N.º 57 con los valores de permeabilidad obtenidos: en forma experimental KLAB y la permeabilidad calculada con la ecuación obtenida mediante KMLR.; para diferentes edades de curado

Tabla 57

Permeabilidad experimental y calculada con la ecuación de MLR

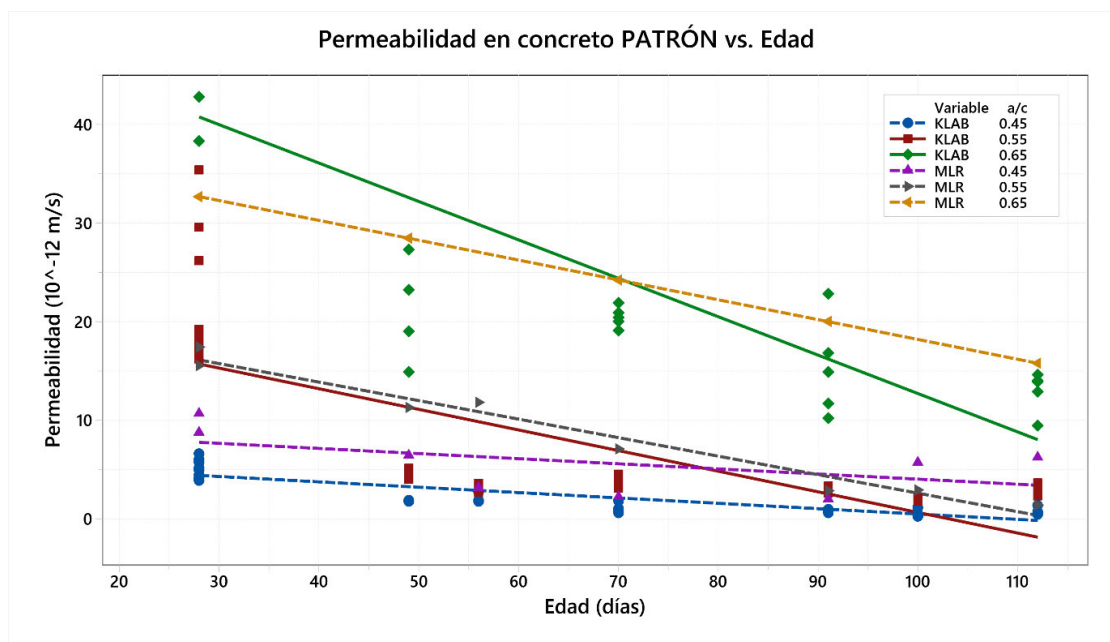
a/c	Adición (%)	Edad (días)	KLAB (10^{-12} m/s)	KMLR (10^{-12} m/s)
0.40	0	28	2.41200	1.22428
0.45	0	28	5.27600	9.72709
0.45	0	49	1.81000	6.45079
0.45	0	56	2.18400	3.13982
0.45	0	70	1.07350	2.22354
0.45	0	91	0.77480	2.00370
0.45	0	100	0.65180	5.71727
0.45	0	112	0.74780	6.23095
0.50	0	28	10.92167	12.85292
0.55	0	28	21.51000	16.47678
0.55	0	49	4.62800	11.29999
0.55	0	56	3.29133	11.79000
0.55	0	70	3.66600	7.07274
0.55	0	91	3.01000	2.84550
0.55	0	100	1.93750	2.93291
0.55	0	112	2.84800	1.38175
0.60	0	28	27.28000	21.13893
0.65	0	28	49.84000	32.67881
0.65	0	49	21.10000	28.45157
0.65	0	70	20.46000	24.22432
0.65	0	91	13.40000	19.99707
0.40	0	28	2.41200	1.22428

Nota: elaboración propia.

Como se mostró en la tabla 57, la correlación obtenida, para la ecuación determinada aplicando el método de MLR es de 70.33%; por lo que se puede notar la diferencia entre los valores de permeabilidad, obtenidos usando ambos métodos (Figura N.º 16).

Figura 16

Permeabilidad calculada con MLR y experimental Vs edad



Nota. Cada recta representa diferentes relaciones de agua cemento, en laboratorio (KLAB) y con la ecuación (MLR).

Permeabilidad del concreto con adición de metacaolín:

En la siguiente Tabla N° 58; se presentan 86 resultados de permeabilidad, del concreto con metacaolín; se consignan también las variables de fabricación tales como: adición, cemento, agua, arena, piedra, aditivo, edad; que serán consideradas para el análisis de correlación múltiple lineal, para las diferentes relaciones a/c y edades; además usando esta data se obtuvo información respecto a las variables de fabricación que tienen mayor incidencia en los valores de la permeabilidad del concreto con adición de metacaolín.

Tabla 58

Variables de fabricación consideradas en concreto con adición de metacaolín

	A/C	Adición (%)	Cemento (kg)	Adición (kg)	Agua (kg)	Arena (kg)	Piedra (kg)	Aditivo (kg)	Edad (días)	K (10^{-12} m/s)
1	0.40	10	324.00	36.00	144	1155.00	777.00	6.50	28	0.3940
2	0.40	10	324.00	36.00	144	1155.00	777.00	6.50	28	0.4140
3	0.40	10	324.00	36.00	144	1155.00	777.00	6.50	28	0.5150
4	0.40	10	324.00	36.00	144	1155.00	777.00	6.50	28	0.5690
5	0.40	10	324.00	36.00	144	1155.00	777.00	6.50	28	0.8240

6	0.40	10	324.00	36.00	144	1155.00	777.00	6.50	28	1.3500
7	0.40	10	324.00	36.00	144	1155.00	777.00	6.50	56	0.0120
8	0.40	10	324.00	36.00	144	1155.00	777.00	6.50	56	0.5330
9	0.40	10	324.00	36.00	144	1155.00	777.00	6.50	56	0.5950
10	0.40	10	324.00	36.00	144	1155.00	777.00	6.50	56	0.6030
11	0.40	10	324.00	36.00	144	1155.00	777.00	6.50	56	0.8100
12	0.40	15	306.00	54.00	144	1153.00	775.00	6.50	28	0.0420
13	0.40	15	306.00	54.00	144	1153.00	775.00	6.50	28	0.1140
14	0.40	15	306.00	54.00	144	1153.00	775.00	6.50	28	0.1350
15	0.40	15	306.00	54.00	144	1153.00	775.00	6.50	28	0.1550
16	0.40	15	306.00	54.00	144	1153.00	775.00	6.50	28	0.1840
17	0.40	15	306.00	54.00	144	1153.00	775.00	6.50	28	0.3460
18	0.40	15	306.00	54.00	144	1153.00	775.00	6.50	56	0.0200
19	0.40	15	306.00	54.00	144	1153.00	775.00	6.50	56	0.0340
20	0.40	15	306.00	54.00	144	1153.00	775.00	6.50	56	0.0730
21	0.40	15	306.00	54.00	144	1153.00	775.00	6.50	56	0.0840
22	0.40	15	306.00	54.00	144	1153.00	775.00	6.50	56	0.0990
23	0.45	10	324.00	36.00	162	1126.00	757.00	6.50	28	0.7070
24	0.45	10	324.00	36.00	162	1126.00	757.00	6.50	28	0.8580
25	0.45	10	324.00	36.00	162	1126.00	757.00	6.50	28	0.8880
26	0.45	10	324.00	36.00	162	1126.00	757.00	6.50	28	0.9090
27	0.45	10	324.00	36.00	162	1126.00	757.00	6.50	28	0.9190
28	0.45	10	324.00	36.00	162	1126.00	757.00	6.50	56	0.5510
29	0.45	10	324.00	36.00	162	1126.00	757.00	6.50	56	0.6470
30	0.45	10	324.00	36.00	162	1126.00	757.00	6.50	56	0.6900
31	0.45	10	324.00	36.00	162	1126.00	757.00	6.50	56	0.8250
32	0.45	10	324.00	36.00	162	1126.00	757.00	6.50	56	0.8350
33	0.45	10	324.00	36.00	162	1126.00	757.00	6.50	56	0.9520
34	0.45	15	306.00	54.00	162	1124.00	756.00	6.50	28	0.0740
35	0.45	15	306.00	54.00	162	1124.00	756.00	6.50	28	0.1080
36	0.45	15	306.00	54.00	162	1124.00	756.00	6.50	28	0.1770
37	0.45	15	306.00	54.00	162	1124.00	756.00	6.50	28	0.2320
38	0.45	15	306.00	54.00	162	1124.00	756.00	6.50	28	0.2530
39	0.45	15	306.00	54.00	162	1124.00	756.00	6.50	28	0.3010
40	0.45	15	306.00	54.00	162	1124.00	756.00	6.50	56	0.0700
41	0.45	15	306.00	54.00	162	1124.00	756.00	6.50	56	0.1240
42	0.45	15	306.00	54.00	162	1124.00	756.00	6.50	56	0.1510
43	0.45	15	306.00	54.00	162	1124.00	756.00	6.50	56	0.1890
44	0.45	15	306.00	54.00	162	1124.00	756.00	6.50	56	0.2170
45	0.50	10	288.00	32.00	160	1152.00	774.00	5.40	28	0.9120
46	0.50	10	288.00	32.00	160	1152.00	774.00	5.40	28	1.5100
47	0.50	10	288.00	32.00	160	1152.00	774.00	5.40	28	1.7900
48	0.50	10	288.00	32.00	160	1152.00	774.00	5.40	28	8.5000
49	0.50	10	288.00	32.00	160	1152.00	774.00	5.40	56	0.9170
50	0.50	10	288.00	32.00	160	1152.00	774.00	5.40	56	0.9590
51	0.50	10	288.00	32.00	160	1152.00	774.00	5.40	56	1.0800
52	0.50	10	288.00	32.00	160	1152.00	774.00	5.40	56	1.1600
53	0.50	10	288.00	32.00	160	1152.00	774.00	5.40	56	1.2900
54	0.50	10	288.00	32.00	160	1152.00	774.00	5.40	56	1.3400
55	0.50	15	272.00	48.00	160	1150.00	773.00	5.40	28	0.0960

56	0.50	15	272.00	48.00	160	1150.00	773.00	5.40	28	0.2140
57	0.50	15	272.00	48.00	160	1150.00	773.00	5.40	28	0.2760
58	0.50	15	272.00	48.00	160	1150.00	773.00	5.40	28	0.2930
59	0.50	15	272.00	48.00	160	1150.00	773.00	5.40	28	0.4310
60	0.50	15	272.00	48.00	160	1150.00	773.00	5.40	56	0.1480
61	0.50	15	272.00	48.00	160	1150.00	773.00	5.40	56	0.2140
62	0.50	15	272.00	48.00	160	1150.00	773.00	5.40	56	0.2240
63	0.50	15	272.00	48.00	160	1150.00	773.00	5.40	56	0.2440
64	0.50	15	272.00	48.00	160	1150.00	773.00	5.40	56	0.2540
65	0.50	15	272.00	48.00	160	1150.00	773.00	5.40	56	0.3210
66	0.55	10	270.00	30.00	165	1155.00	777.00	4.80	28	2.1100
67	0.55	10	270.00	30.00	165	1155.00	777.00	4.80	28	2.4800
68	0.55	10	270.00	30.00	165	1155.00	777.00	4.80	28	2.8300
69	0.55	10	270.00	30.00	165	1155.00	777.00	4.80	28	3.3800
70	0.55	10	270.00	30.00	165	1155.00	777.00	4.80	28	3.6300
71	0.55	10	270.00	30.00	165	1155.00	777.00	4.80	56	1.3800
72	0.55	10	270.00	30.00	165	1155.00	777.00	4.80	56	1.6600
73	0.55	10	270.00	30.00	165	1155.00	777.00	4.80	56	1.9900
74	0.55	10	270.00	30.00	165	1155.00	777.00	4.80	56	2.2200
75	0.55	10	270.00	30.00	165	1155.00	777.00	4.80	56	2.3100
76	0.55	15	255.00	45.00	165	1154.00	776.00	4.80	28	0.2490
77	0.55	15	255.00	45.00	165	1154.00	776.00	4.80	28	0.2690
78	0.55	15	255.00	45.00	165	1154.00	776.00	4.80	28	0.2690
79	0.55	15	255.00	45.00	165	1154.00	776.00	4.80	28	0.3390
80	0.55	15	255.00	45.00	165	1154.00	776.00	4.80	28	0.7510
81	0.55	15	255.00	45.00	165	1154.00	776.00	4.80	56	0.1940
82	0.55	15	255.00	45.00	165	1154.00	776.00	4.80	56	0.2080
83	0.55	15	255.00	45.00	165	1154.00	776.00	4.80	56	0.2230
84	0.55	15	255.00	45.00	165	1154.00	776.00	4.80	56	0.2490
85	0.55	15	255.00	45.00	165	1154.00	776.00	4.80	56	0.3000
86	0.55	15	255.00	45.00	165	1154.00	776.00	4.80	56	0.3060

Nota: Resaltado en Amarillo se muestran valores atípicos calculados con la prueba de Grubbs.

– Análisis de valores atípicos

El análisis de valores atípicos se realizó a todo el conjunto de 86 valores de permeabilidad en concreto con adición de metacaolín, utilizando el test de Grubbs; para el análisis se consideraron grupos de la misma relación a/c; por razones prácticas aquí se reportan solo aquellos donde se identificaron valores atípicos.

Tabla 59

Valores estadísticos del concreto con 10% de metacaolín y a/c = 0.45, N=11

Variable	Edad (días)	N	Media	Desv.Est.	Mín.	Máx.	G	P
Permeabilidad (10^{-12} m/s)	28	5	0.8562	0.0866	0.7070	0.9190	1.72	0.043
Permeabilidad (10^{-12} m/s)	56	6	0.7500	0.1466	0.5510	0.9520	1.38	0.848

Nota: elaboración propia.

Un valor atípico de permeabilidad a 28 días y un valor atípico identificado a los 56 días en muestras concreto con metacaolín

Tabla 60

Valores atípicos en el concreto con 10% de metacaolín y $a/c=0.45$

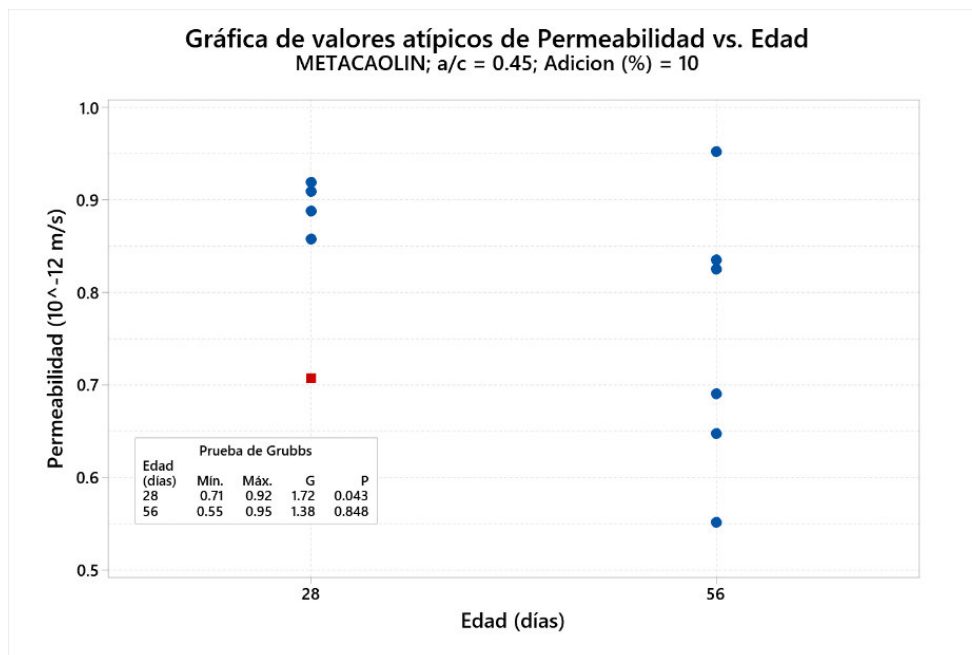
Variable	Edad (días)	Fila	Valor Atípico
Permeabilidad (10^{-12} m/s)	28	23	0.707

Un solo valor atípico

Nota: elaboración propia.

Figura 17

Valor atípico permeabilidad para $a/c=0.45$, concreto con 10% de metacaolín



Nota. Se aprecia un valor atípico representado por el cuadrado rojo.

Tabla 61

Valores estadísticos del concreto con 10% de metacaolín, para $a/c = 0.50$

Variable	Edad		Media	Desv.Est.	Mín.	Máx.	G	P
	(días)	N						
Permeabilidad (10^{-12} m/s)	28	4	3.18	3.57	0.91	8.50	1.49	0.021
	56	6	1.1243	0.1718	0.9170	1.3400	1.26	1.000

Nota: Se observan cambios en la permeabilidad a las edades consideradas

Tabla 62 **Tabla 1:**

Valores atípicos de permeabilidad del concreto con 10% de metacaolín, para $a/c = 0.50$

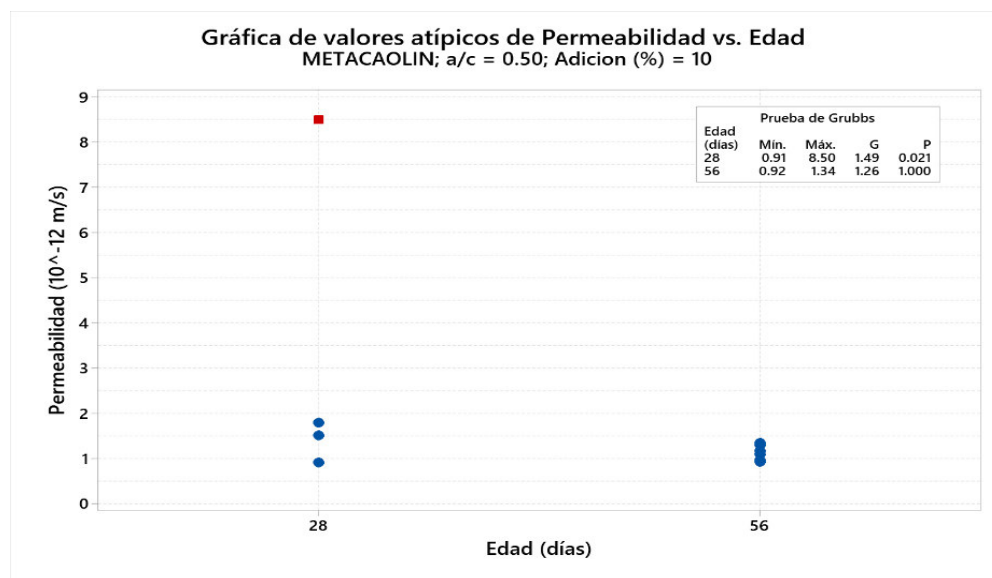
Variable	Edad (días)	Fila	Valor atípico
Permeabilidad (10^{-12} m/s)	28	48	8.5

Nota: elaboración propia.

Un valor atípico encontrado en la fila 48 , obsérvese en la figura 18 este valor atípico identificado

Figura 18

Valor atípico de permeabilidad, $a/c=0.50$, concreto con metacaolín 10



Nota. Se aprecia un valor atípico representado por el cuadrado rojo.

Tabla 63

Valores estadísticos del concreto con 15% de metacaolín, para $a/c = 0.55$; $N=11$

Variable	Edad (días)	N	Media	Desv.Est.	Mín.	Máx.	G	P
Permeabilidad (10 ⁻¹² m/s)	28	5	0.3754	0.2127	0.2490	0.7510	1.77	0.009
	56	6	0.2467	0.0473	0.1940	0.3060	1.25	1.000

Nota: elaboración propia.

Un valor atípico identificado en muestras con 28 días y un valor atípico en muestras con 56 días de edad

Tabla 64

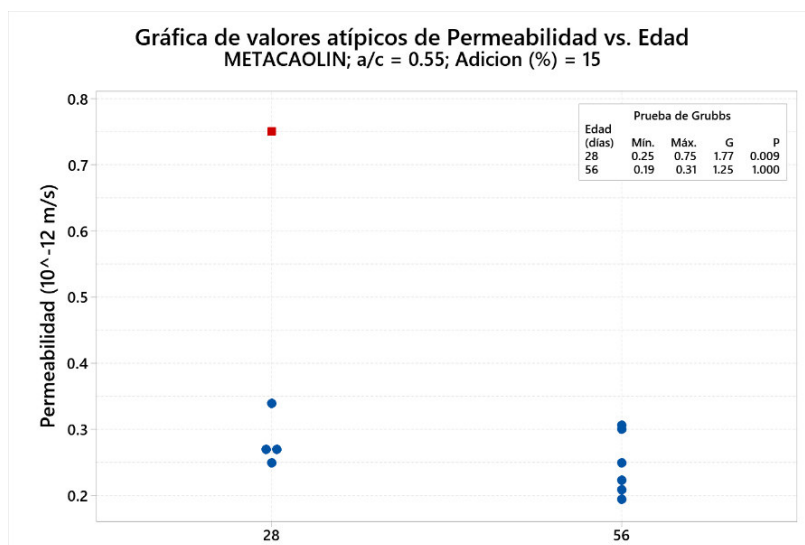
Valor atípico de permeabilidad del concreto con 15% de metacaolín, para $a/c = 0.55$

Variable	Edad (días)	Fila	Valor atípico
Permeabilidad (10 ⁻¹² m/s)	28	80	0.751

Nota: elaboración propia.

Figura 19

Valores atípicos permeabilidad para $a/c = 0.55$, concreto 15% metacaolín



Nota. Se aprecia un valor atípico representado por el cuadrado rojo.

Análisis de regresión Múltiple Lineal

Mediante el uso del Matlab y utilizando las variables de fabricación presentadas en la Tabla N.º 58, se buscó la ecuación de regresión múltiple lineal (MRL), que mejor se ajustase con la data de permeabilidad, obtenida en forma experimental; previo análisis se encontraron ecuaciones con muy buenos factores de correlación, que permitirán determinar la Permeabilidad (10^{-12} m/s) del concreto a partir de los datos teóricos del diseño de mezcla tales como: Cemento (kg); Agua (kg); Arena (kg); Piedra (kg); Aditivo(kg); Edad (días).

Ecuación de regresión múltiple lineal; se presenta la ecuación que estima los valores de permeabilidad a partir de datos de la adición, cemento, agua, arena, piedra y edad

Ecuación de regresión múltiple lineal

$$\text{Permeabilidad (m/s)} = 3215 - 0.445 \text{ Cemento (kg)} - 0.727 \text{ Adición (kg)} - 3.336 \text{ Agua (kg)} - 1.708 \text{ Arena (kg)} - 0.547 \text{ Piedra (kg)} - 25.49 \text{ Aditivo(kg)} - 0.00790 \text{ Edad (días)}$$

Tabla 65

Coefficientes de correlación de Regresión múltiple

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	3215	374	8.60	0.000	
Cemento (kg)	-0.445	0.130	-3.43	0.001	7729.64
Adición (kg)	-0.727	0.145	-5.01	0.000	1334.84
Agua (kg)	-3.336	0.386	-8.63	0.000	7973.92
Arena (kg)	-1.708	0.217	-7.86	0.000	5633.61
Piedra (kg)	-0.547	0.182	-3.00	0.004	1787.18
Aditivo(kg)	-25.49	4.50	-5.67	0.000	8409.61
Edad (días)	-0.00790	0.00259	-3.05	0.003	1.02

Nota: elaboración propia.

De los valores obtenidos se puede observar que las variables que más inciden la estimación de la permeabilidad es el cemento, agua y la adición.

Tabla 66

Coefficientes de correlación

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.326162	83.79%	82.28%	79.92%

Nota. Se alcanzó un factor de correlación de 83.79% con el coeficiente de permeabilidad del concreto con Metacaolín; superior al encontrado para la ecuación de MRL del concreto patrón.

Tabla 67*Análisis de Varianza*

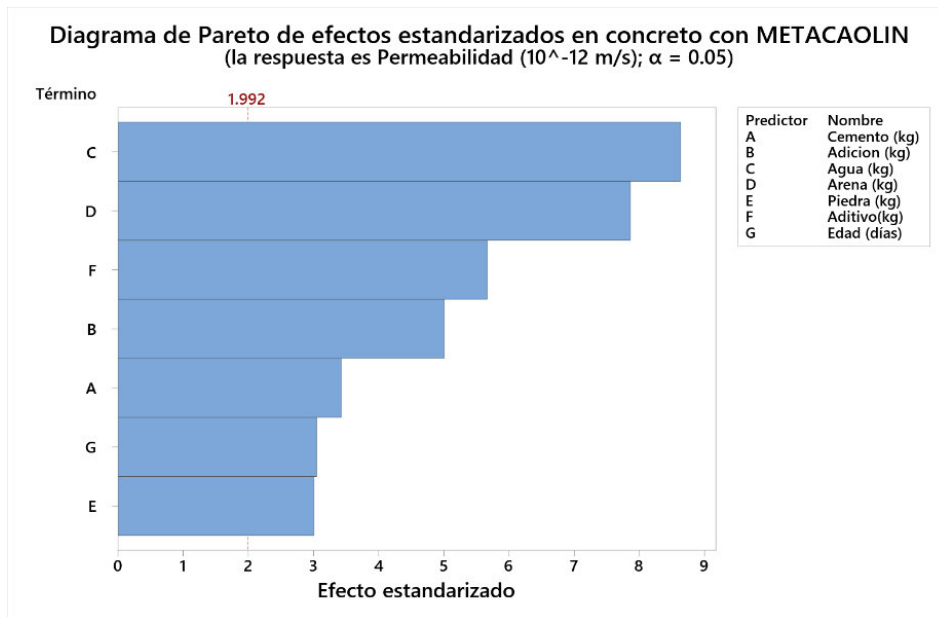
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	7	41.2511	5.89302	55.39	0.000
Cemento (kg)	1	1.2487	1.24865	11.74	0.001
Adición (kg)	1	2.6671	2.66713	25.07	0.000
Agua (kg)	1	7.9316	7.93158	74.56	0.000
Arena (kg)	1	6.5759	6.57591	61.81	0.000
Piedra (kg)	1	0.9601	0.96007	9.02	0.004
Aditivo(kg)	1	3.4169	3.41690	32.12	0.000
Edad (días)	1	0.9891	0.98913	9.30	0.003
Error	75	7.9786	0.10638		
Falta de ajuste	8	3.9302	0.49128	8.13	0.000
Error puro	67	4.0484	0.06042		
Total	82	49.2298			

Nota: elaboración propia.

Mediante el diagrama de Pareto en la Figura N.º 20 observamos que las variables de fabricación que más incidieron en la permeabilidad del concreto son: agua, adición, cemento, arena; y que las que menos incidencia tienen son piedra y el aditivo.

Figura 20

Diagrama de Pareto variables: cemento, adición, arena, agua, piedra, aditivo



Nota: elaboración propia.

Permeabilidad mediante regresión múltiple lineal (MLR), y factor de durabilidad

Se presenta a continuación valores del coeficiente de permeabilidad obtenidos en forma experimental en laboratorio KLAB y la permeabilidad calculada con la ecuación obtenida mediante KMLR; asimismo se incorpora una relación entre la resistencia a compresión evaluada en concreto sin adición, respecto de la resistencia a la compresión con adición: este factor determinado servirá para asegurar la durabilidad del concreto. Según: Aref M. al-Swaidani (2022); la resistencia a compresión relativa entre el concreto sin adición y con adición (f_o/f_i) menos la permeabilidad relativa $K_{\text{sin adición}}/K_{\text{con adición}}$ (K_i/K_o); deben ser mayores a 1 para asegurar la durabilidad del concreto; por ello en la tabla 68, se presentan los cálculos de este índice de durabilidad realizados con los datos de permeabilidad promedio validados en los ítems anteriores para cada a/c y tipo de adición ; estos índices serán un gran aporte para los casos donde se conozca la resistencia con y sin adición, y se quiera hacer una calificación del grado de permeabilidad;

$$f_i/f_o \geq K_i/K_o$$

Aplicando los datos de K_o (permeabilidad sin adición) y K_i (permeabilidad con adición de metacaolín); obtenemos los valores de aproximación para cada a/c; en los diferentes contenidos de metacaolín y edades de curado.

Tabla 68

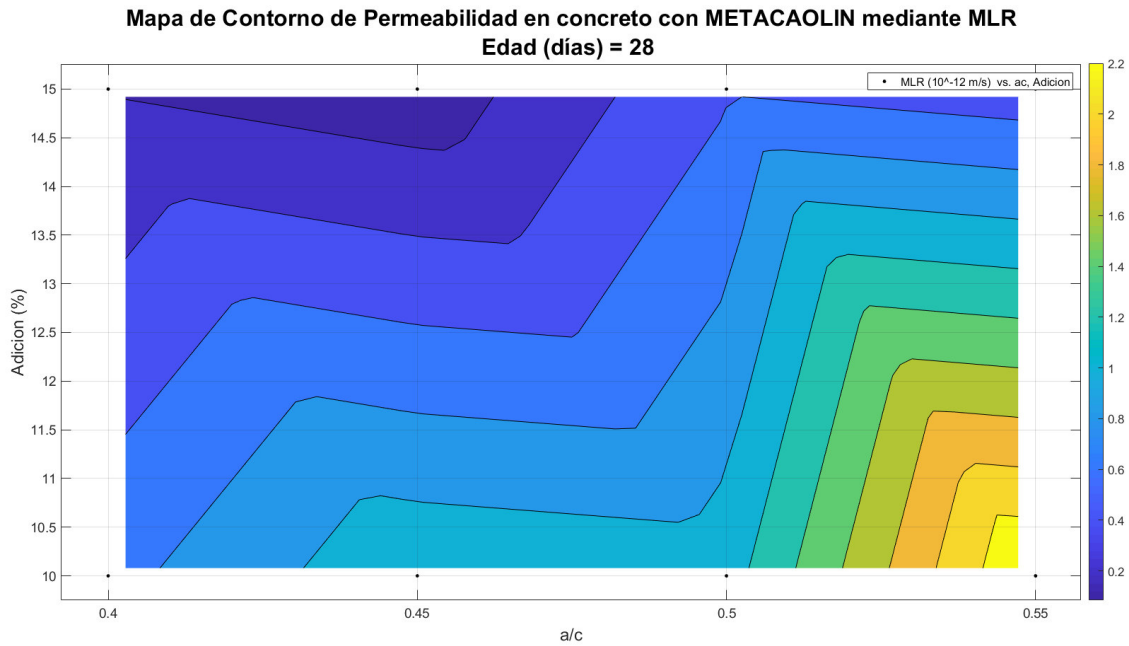
Permeabilidad experimental y calculada con MLR -índice de durabilidad f_i/f_o

a/c	Adición (%)	Edad (días)	KLAB (10^{-12} m/s)	KMLR (10^{-12} m/s)	Permeabilidad Relativa K_i/K_o	$f_i/f_o \geq$
0.40	10	28	0.67767	0.73670	0.056191266	1.05619 1
0.40	10	56	0.51060	0.51551	0.042338308	1.04233 8
0.40	15	28	0.16267	0.18302	0.013488115	1.01348 8
0.40	15	56	0.06200	0.03817	0.005140962	1.00514 1
0.45	10	28	0.89350	1.16738	0.016935178	1.01693 5
0.45	10	56	0.75000	0.94619	0.014215315	1.01421 5
0.45	15	28	0.19083	0.06630	0.003617008	1.00361 7
0.45	15	56	0.15020	0.15489	0.002846854	1.00284 7
0.50	10	28	1.40400	1.11250	0.021425301	1.02142 5
0.50	10	56	1.12433	0.89131	0.017157536	1.01715 8
0.50	15	28	0.26200	0.57407	0.003998169	1.00399 8
0.50	15	56	0.23417	0.35288	0.003573427	1.00357 3
0.55	10	28	2.88600	2.43384	0.016060100	1.01606
0.55	10	56	1.91200	2.21265	0.010639955	1.01064
0.55	15	28	0.28150	0.46907	0.001566500	1.00156 6
0.55	15	56	0.24667	0.24788	0.001372658	1.00137 3

Nota: elaboración propia.

Figura 21

Mapa de contorno de permeabilidad en concreto con Metacaolín Mediante MLR

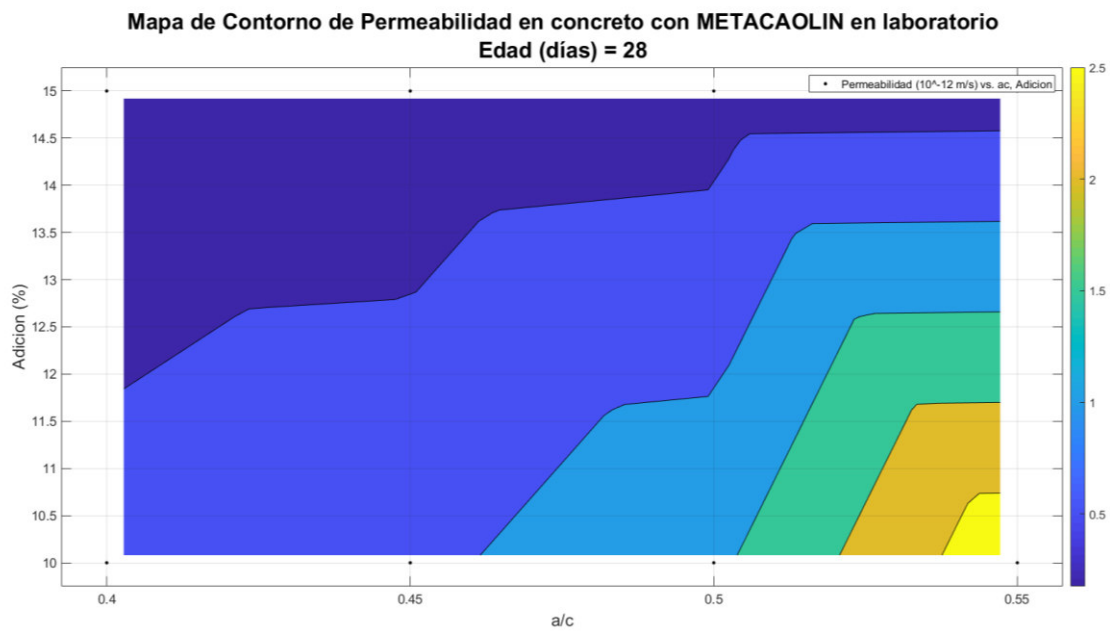


Nota: elaboración propia.

Mapa de contorno elaborado con los valores de permeabilidad calculados mediante las ecuaciones de regresión múltiple lineal

Figura 22

Mapa de contorno permeabilidad concreto con Metacaolín condición- laboratorio

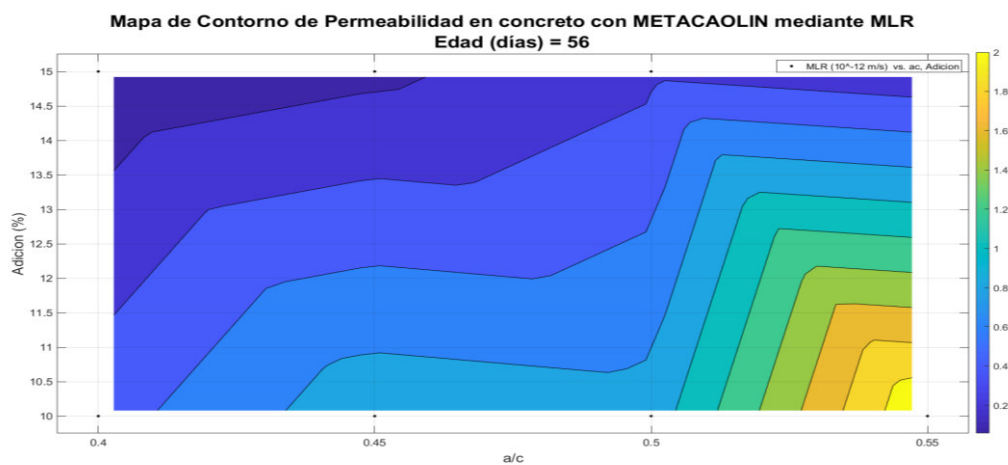


Nota: elaboración propia.

Los mapas de contorno presentado en las figuras N.º 21 y 22, fueron elaborados con valores de permeabilidad de laboratorio; si se comparan los mapas se observan que son muy similares.

Figura 23

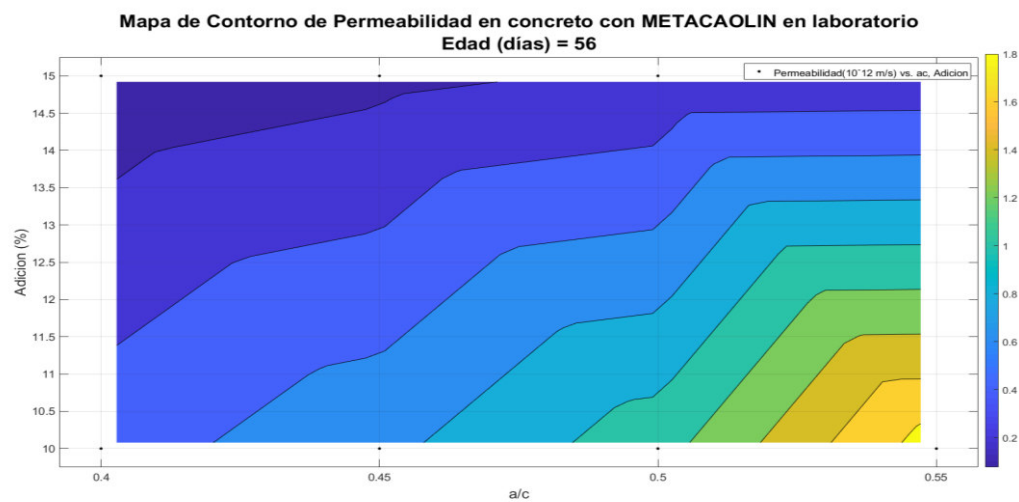
Mapa de contorno permeabilidad concreto con Metacaolín Mediante MLR-56



Nota: elaboración propia.

Figura 24

Mapa contorno permeabilidad en concreto con Metacaolín condición- laboratorio

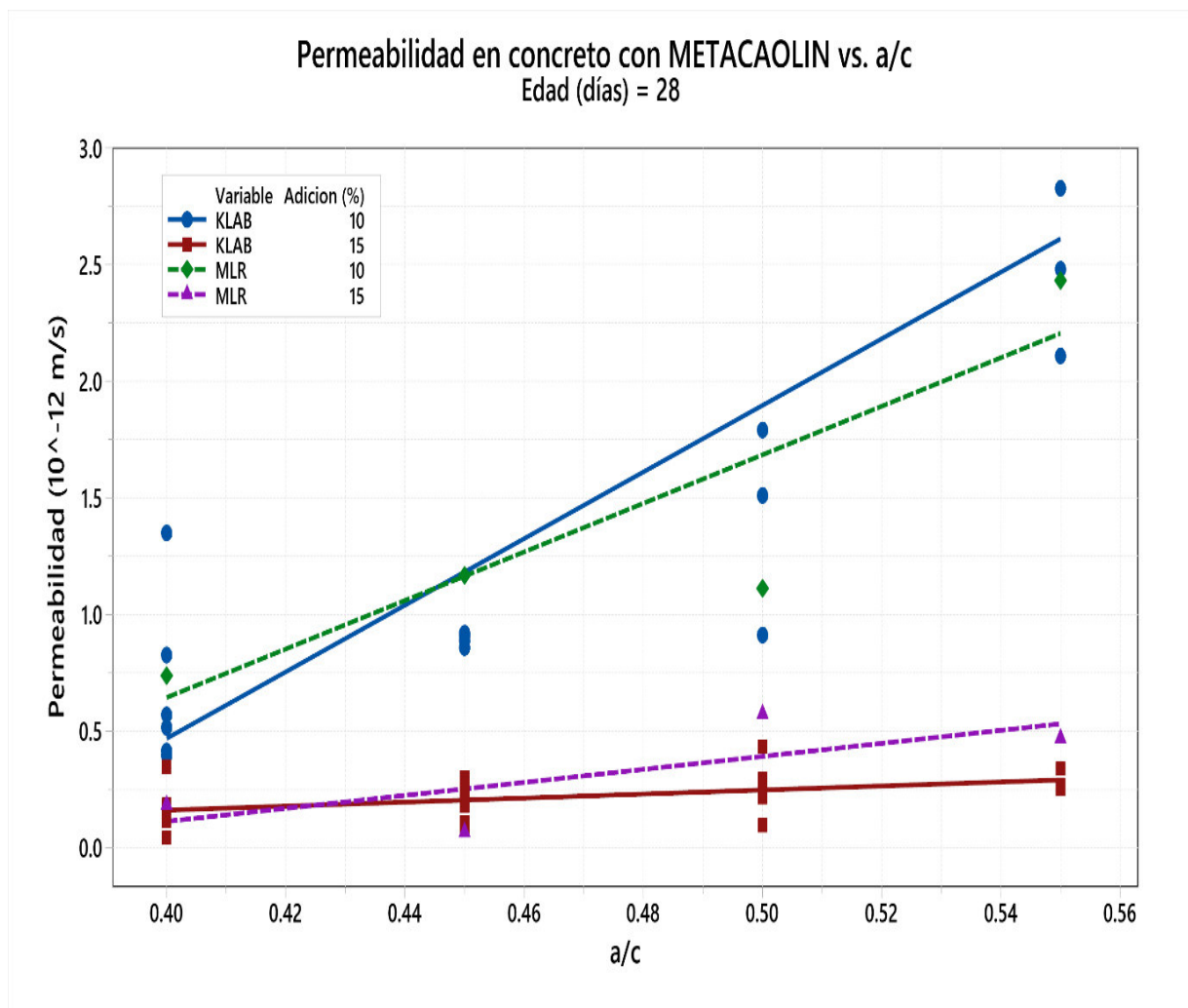


Nota: elaboración propia.

Se muestran los mapas de contorno de permeabilidad en los concretos con Metacaolín para 56 días en las figuras N.º 23 y 24; calculados, usando la ecuación MLR y con los valores de permeabilidad obtenidos en laboratorio; donde se observa muy buena correlación con ambos métodos.

Figura 25

Graficas comparativas de Permeabilidad con MLR y experimental Vs edad

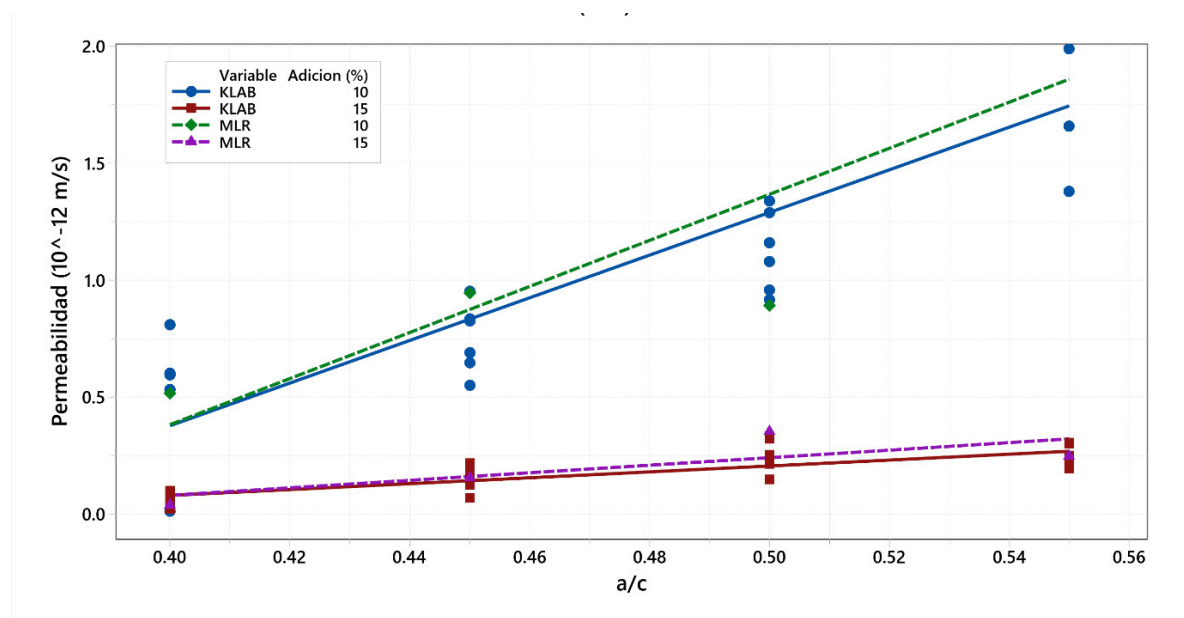


Nota: elaboración propia.

En forma gráfica se trata de representar las diferencias entre las permeabilidades obtenidas experimentalmente en laboratorio; respecto de las obtenidas con la ecuación de regresión múltiple lineal.

Figura 26

Graficas comparativas de Permeabilidad calculada con MLR y permeabilidad experimental Vs relaciones agua cemento a 56 días



Nota: elaboración propia.

En las Figuras N.º 25 y 26 se puede observar en forma gráfica la buena aproximación de los valores de permeabilidad calculados en forma experimental mediante MLR y en laboratorio; las mejores aproximaciones se observan a los 56 días; los menores valores de permeabilidad fueron obtenidos, para 0.40 y 15 % a la edad de 56 días.

Permeabilidad del concreto con adición de microsílíce:

En la siguiente Tabla N°69 se presentan 142 datos del concreto con adición de microsílíce, considerados para la evaluación de los resultados de permeabilidad en el concreto sin adición o concreto de control; se consignan también las variables de fabricación tales como: microsílíce, cemento, agua, arena, piedra, aditivo, edad; que serán consideradas para el análisis de correlación múltiple lineal, del conjunto de datos para las diferentes relaciones a/c

y edades; además usando esta data se obtuvo información valiosa de cuáles son las variables de fabricación que tienen mayor incidencia en los valores de la permeabilidad.

Tabla 69

Variables de fabricación consideradas en concreto con adición de microsílíce

N°	A/C	Adición (%)	Cemento (kg)	Adición (kg)	Agua (kg)	Arena (kg)	Piedra (kg)	Aditivo kg	Edad (días)	Permeabilidad (10^{-12} m/s)
1	0.40	5	342.00	18.00	144.00	914.50	998.20	6.10	28	0.2180
2	0.40	5	342.00	18.00	144.00	914.50	998.20	6.10	28	0.2880
3	0.40	5	342.00	18.00	144.00	914.50	998.20	6.10	28	0.3210
4	0.40	5	342.00	18.00	144.00	914.50	998.20	6.10	28	0.3210
5	0.40	5	342.00	18.00	144.00	914.50	998.20	6.10	28	0.3460
6	0.40	5	342.00	18.00	144.00	914.50	998.20	6.10	56	0.2290
7	0.40	5	342.00	18.00	144.00	914.50	998.20	6.10	56	0.2470
8	0.40	5	342.00	18.00	144.00	914.50	998.20	6.10	56	0.2510
9	0.40	5	342.00	18.00	144.00	914.50	998.20	6.10	56	0.2810
10	0.40	5	342.00	18.00	144.00	914.50	998.20	6.10	56	0.3290
11	0.40	5	342.00	18.00	144.00	914.50	998.20	6.10	100	0.1280
12	0.40	5	342.00	18.00	144.00	914.50	998.20	6.10	100	0.1340
13	0.40	5	342.00	18.00	144.00	914.50	998.20	6.10	100	0.1410
14	0.40	5	342.00	18.00	144.00	914.50	998.20	6.10	100	0.1830
15	0.40	5	342.00	18.00	144.00	914.50	998.20	6.10	100	0.1940
16	0.40	5	342.00	18.00	144.00	914.50	998.20	6.10	100	0.2740
17	0.40	10	324.00	36.00	144.00	910.90	994.20	6.50	28	0.0600
18	0.40	10	324.00	36.00	144.00	910.90	994.20	6.50	28	0.1120
19	0.40	10	324.00	36.00	144.00	910.90	994.20	6.50	28	0.1350
20	0.40	10	324.00	36.00	144.00	910.90	994.20	6.50	28	0.1650
21	0.40	10	324.00	36.00	144.00	910.90	994.20	6.50	28	0.1650
22	0.40	10	324.00	36.00	144.00	910.90	994.20	6.50	56	0.0150
23	0.40	10	324.00	36.00	144.00	910.90	994.20	6.50	56	0.0640
24	0.40	10	324.00	36.00	144.00	910.90	994.20	6.50	56	0.0850
25	0.40	10	324.00	36.00	144.00	910.90	994.20	6.50	56	0.0930
26	0.40	10	324.00	36.00	144.00	910.90	994.20	6.50	100	0.0150
27	0.40	10	324.00	36.00	144.00	910.90	994.20	6.50	100	0.0170
28	0.40	10	324.00	36.00	144.00	910.90	994.20	6.50	100	0.0350
29	0.45	5	342.00	18.00	162.00	891.50	973.00	6.10	28	0.3150
30	0.45	5	342.00	18.00	162.00	891.50	973.00	6.10	28	0.3610
31	0.45	5	342.00	18.00	162.00	891.50	973.00	6.10	28	0.3920
32	0.45	5	342.00	18.00	162.00	891.50	973.00	6.10	28	0.4910
33	0.45	5	342.00	18.00	162.00	891.50	973.00	6.10	28	0.5050
34	0.45	5	342.00	18.00	162.00	891.50	973.00	6.10	56	0.3040
35	0.45	5	342.00	18.00	162.00	891.50	973.00	6.10	56	0.3440
36	0.45	5	342.00	18.00	162.00	891.50	973.00	6.10	56	0.4040

37	0.45	5	342.00	18.00	162.00	891.50	973.00	6.10	56	0.4630
38	0.45	5	342.00	18.00	162.00	891.50	973.00	6.10	56	0.5120
39	0.45	5	342.00	18.00	162.00	891.50	973.00	6.10	56	0.5260
40	0.45	5	342.00	18.00	162.00	891.50	973.00	6.10	100	0.1780
41	0.45	5	342.00	18.00	162.00	891.50	973.00	6.10	100	0.2720
42	0.45	5	342.00	18.00	162.00	891.50	973.00	6.10	100	0.2990
43	0.45	10	324.00	36.00	162.00	887.90	969.10	6.50	28	0.0880
44	0.45	10	324.00	36.00	162.00	887.90	969.10	6.50	28	0.1360
45	0.45	10	324.00	36.00	162.00	887.90	969.10	6.50	28	0.1430
46	0.45	10	324.00	36.00	162.00	887.90	969.10	6.50	28	0.1780
47	0.45	10	324.00	36.00	162.00	887.90	969.10	6.50	28	0.2080
48	0.45	10	324.00	36.00	162.00	887.90	969.10	6.50	28	0.2170
49	0.45	10	324.00	36.00	162.00	887.90	969.10	6.50	56	0.0940
50	0.45	10	324.00	36.00	162.00	887.90	969.10	6.50	56	0.1470
51	0.45	10	324.00	36.00	162.00	887.90	969.10	6.50	56	0.1870
52	0.45	10	324.00	36.00	162.00	887.90	969.10	6.50	100	0.0270
53	0.45	10	324.00	36.00	162.00	887.90	969.10	6.50	100	0.0270
54	0.45	10	324.00	36.00	162.00	887.90	969.10	6.50	100	0.0520
55	0.45	10	324.00	36.00	162.00	887.90	969.10	6.50	100	0.0690
56	0.50	5	304.00	16.00	160.00	911.80	995.20	5.10	28	0.4410
57	0.50	5	304.00	16.00	160.00	911.80	995.20	5.10	28	0.4790
58	0.50	5	304.00	16.00	160.00	911.80	995.20	5.10	28	0.5260
59	0.50	5	304.00	16.00	160.00	911.80	995.20	5.10	28	0.5340
60	0.50	5	304.00	16.00	160.00	911.80	995.20	5.10	28	0.6440
61	0.50	5	304.00	16.00	160.00	911.80	995.20	5.10	28	0.7080
62	0.50	5	304.00	16.00	160.00	911.80	995.20	5.10	56	0.1300
63	0.50	5	304.00	16.00	160.00	911.80	995.20	5.10	56	0.4640
64	0.50	5	304.00	16.00	160.00	911.80	995.20	5.10	56	0.5190
65	0.50	5	304.00	16.00	160.00	911.80	995.20	5.10	56	0.6050
66	0.50	5	304.00	16.00	160.00	911.80	995.20	5.10	56	0.6690
67	0.50	5	304.00	16.00	160.00	911.80	995.20	5.10	100	0.2770
68	0.50	5	304.00	16.00	160.00	911.80	995.20	5.10	100	0.2820
69	0.50	5	304.00	16.00	160.00	911.80	995.20	5.10	100	0.3380
70	0.50	5	304.00	16.00	160.00	911.80	995.20	5.10	100	0.3710
71	0.50	5	304.00	16.00	160.00	911.80	995.20	5.10	100	0.4050
72	0.50	10	288.00	32.00	160.00	909.00	992.10	5.10	28	0.1940
73	0.50	10	288.00	32.00	160.00	909.00	992.10	5.10	28	0.2040
74	0.50	10	288.00	32.00	160.00	909.00	992.10	5.10	28	0.2180
75	0.50	10	288.00	32.00	160.00	909.00	992.10	5.10	28	0.2280
76	0.50	10	288.00	32.00	160.00	909.00	992.10	5.10	28	0.2480
77	0.50	10	288.00	32.00	160.00	909.00	992.10	5.10	56	0.1590
78	0.50	10	288.00	32.00	160.00	909.00	992.10	5.10	56	0.1630
79	0.50	10	288.00	32.00	160.00	909.00	992.10	5.10	56	0.1990
80	0.50	10	288.00	32.00	160.00	909.00	992.10	5.10	56	0.2080
81	0.50	10	288.00	32.00	160.00	909.00	992.10	5.10	100	0.0420
82	0.50	10	288.00	32.00	160.00	909.00	992.10	5.10	100	0.0490
83	0.50	10	288.00	32.00	160.00	909.00	992.10	5.10	100	0.0660
84	0.50	10	288.00	32.00	160.00	909.00	992.10	5.10	100	0.1020
85	0.55	5	285.00	15.00	165.00	914.10	997.70	4.80	28	0.5640
86	0.55	5	285.00	15.00	165.00	914.10	997.70	4.80	28	0.5640

87	0.55	5	285.00	15.00	165.00	914.10	997.70	4.80	28	0.6060
88	0.55	5	285.00	15.00	165.00	914.10	997.70	4.80	28	0.6320
89	0.55	5	285.00	15.00	165.00	914.10	997.70	4.80	28	0.6960
90	0.55	5	285.00	15.00	165.00	914.10	997.70	4.80	28	0.7050
91	0.55	5	285.00	15.00	165.00	914.10	997.70	4.80	56	0.4600
92	0.55	5	285.00	15.00	165.00	914.10	997.70	4.80	56	0.4900
93	0.55	5	285.00	15.00	165.00	914.10	997.70	4.80	56	0.5140
94	0.55	5	285.00	15.00	165.00	914.10	997.70	4.80	56	0.5430
95	0.55	5	285.00	15.00	165.00	914.10	997.70	4.80	56	0.6290
96	0.55	5	285.00	15.00	165.00	914.10	997.70	4.80	100	0.1880
97	0.55	5	285.00	15.00	165.00	914.10	997.70	4.80	100	0.3090
98	0.55	5	285.00	15.00	165.00	914.10	997.70	4.80	100	0.3610
99	0.55	5	285.00	15.00	165.00	914.10	997.70	4.80	100	0.3950
100	0.55	5	285.00	15.00	165.00	914.10	997.70	4.80	100	0.4380
101	0.55	5	285.00	15.00	165.00	914.10	997.70	4.80	100	1.0000
102	0.55	10	270.00	30.00	165.00	911.50	994.80	4.80	28	0.2590
103	0.55	10	270.00	30.00	165.00	911.50	994.80	4.80	28	0.3280
104	0.55	10	270.00	30.00	165.00	911.50	994.80	4.80	28	0.4200
105	0.55	10	270.00	30.00	165.00	911.50	994.80	4.80	28	0.4550
106	0.55	10	270.00	30.00	165.00	911.50	994.80	4.80	28	0.5150
107	0.55	10	270.00	30.00	165.00	911.50	994.80	4.80	56	0.0460
108	0.55	10	270.00	30.00	165.00	911.50	994.80	4.80	56	0.2750
109	0.55	10	270.00	30.00	165.00	911.50	994.80	4.80	56	0.3040
110	0.55	10	270.00	30.00	165.00	911.50	994.80	4.80	56	0.3160
111	0.55	10	270.00	30.00	165.00	911.50	994.80	4.80	100	0.0810
112	0.55	10	270.00	30.00	165.00	911.50	994.80	4.80	100	0.0840
113	0.55	10	270.00	30.00	165.00	911.50	994.80	4.80	100	0.1100
114	0.60	5	266.00	14.00	168.00	919.00	1003.00	4.50	28	0.2340
115	0.60	5	266.00	14.00	168.00	919.00	1003.00	4.50	28	0.6620
116	0.60	5	266.00	14.00	168.00	919.00	1003.00	4.50	28	0.7380
117	0.60	5	266.00	14.00	168.00	919.00	1003.00	4.50	28	0.7670
118	0.60	5	266.00	14.00	168.00	919.00	1003.00	4.50	28	0.8080
119	0.60	5	266.00	14.00	168.00	919.00	1003.00	4.50	56	0.4840
120	0.60	5	266.00	14.00	168.00	919.00	1003.00	4.50	56	0.5120
121	0.60	5	266.00	14.00	168.00	919.00	1003.00	4.50	56	0.5450
122	0.60	5	266.00	14.00	168.00	919.00	1003.00	4.50	56	0.5850
123	0.60	5	266.00	14.00	168.00	919.00	1003.00	4.50	56	0.6290
124	0.60	5	266.00	14.00	168.00	919.00	1003.00	4.50	100	0.2920
125	0.60	5	266.00	14.00	168.00	919.00	1003.00	4.50	100	0.3300
126	0.60	5	266.00	14.00	168.00	919.00	1003.00	4.50	100	0.4200
127	0.60	5	266.00	14.00	168.00	919.00	1003.00	4.50	100	0.4580
128	0.60	5	266.00	14.00	168.00	919.00	1003.00	4.50	100	0.4970
129	0.60	5	266.00	14.00	168.00	919.00	1003.00	4.50	100	0.5050
130	0.60	10	252.00	28.00	168.00	916.50	1000.30	4.50	28	0.2970
131	0.60	10	252.00	28.00	168.00	916.50	1000.30	4.50	28	0.3410
132	0.60	10	252.00	28.00	168.00	916.50	1000.30	4.50	28	0.3740
133	0.60	10	252.00	28.00	168.00	916.50	1000.30	4.50	28	0.4230
134	0.60	10	252.00	28.00	168.00	916.50	1000.30	4.50	28	0.5810
135	0.60	10	252.00	28.00	168.00	916.50	1000.30	4.50	28	0.5810
136	0.60	10	252.00	28.00	168.00	916.50	1000.30	4.50	56	0.0570

137	0.60	10	252.00	28.00	168.00	916.50	1000.30	4.50	56	0.3160
138	0.60	10	252.00	28.00	168.00	916.50	1000.30	4.50	56	0.3350
139	0.60	10	252.00	28.00	168.00	916.50	1000.30	4.50	100	0.0180
140	0.60	10	252.00	28.00	168.00	916.50	1000.30	4.50	100	0.0740
141	0.60	10	252.00	28.00	168.00	916.50	1000.30	4.50	100	0.0840
142	0.60	10	252.00	28.00	168.00	916.50	1000.30	4.50	100	0.0870

Nota. Resaltado en Amarillo se muestran los valores atípicos determinados con la prueba de

Grubbs

Análisis de valores atípicos

El análisis de valores atípicos se realizó a todo el conjunto de 142 datos de concreto con adición de microsílíce, utilizando el test de Grubbs; para el análisis se consideraron grupos correspondientes a la misma relación agua cemento; por razones prácticas en las siguientes tablas y figuras se reportan solo aquellos, dónde se identificaron valores atípicos.

Tabla 70

Valores estadísticos de permeabilidad 5% de microsílíce, $a/c = 0.55$; $N=17$

Variable	Edad		N	Media	Desv.Est.	Mín.	Máx.	G	P
	(días)								
Permeabilidad (10^{-12} m/s)	28	6	6	0.6278	0.0620	0.5640	0.7050	1.24	1.000
Permeabilidad (10^{-12} m/s)	56	5	5	0.5272	0.0646	0.4600	0.6290	1.58	0.242
Permeabilidad (10^{-12} m/s)	100	6	6	0.448	0.284	0.188	1.000	1.94	0.020

Nota: elaboración propia.

Se presenta el análisis estadístico, realizado a 17 valores de coeficiente de permeabilidad del concreto con adición de 5% de microsílíce, $a/c=0.55$; edades de curado 28,56 y 100 días.

Tabla 71

Valor atípico en el concreto con 5% de microsílíce $a/c=0.55$

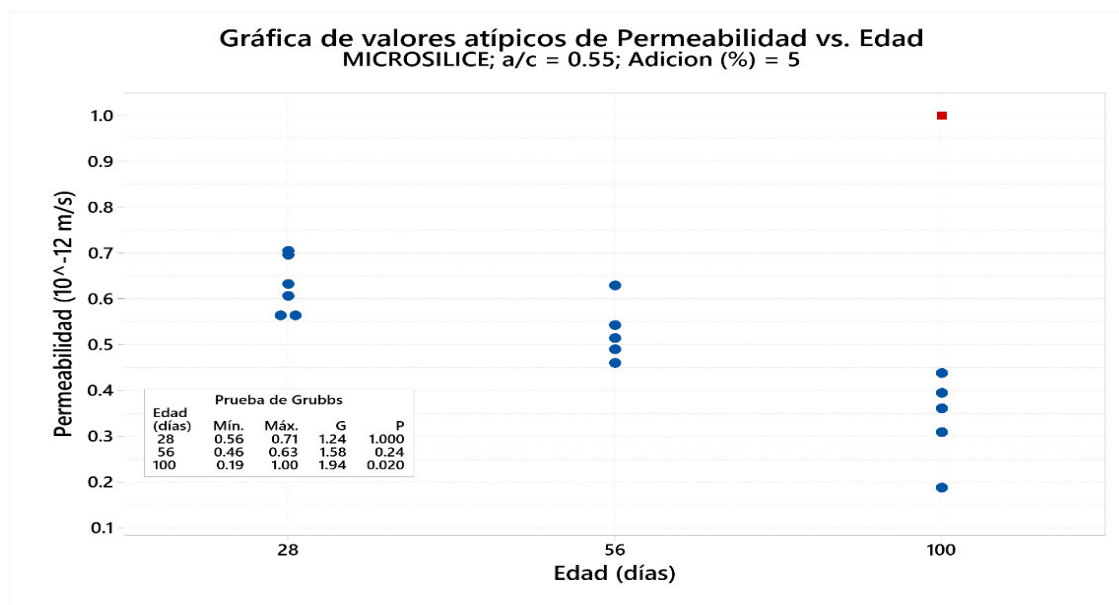
Variable	Edad (días)	Fila	Valor, atípico
Permeabilidad (10^{-12} m/s)	100	101	1

Nota: elaboración propia.

En la fila 101 en amarillo se resaltó el valor atípico obtenido mediante la prueba de Grubbs.

Figura 27

Valor atípico permeabilidad para $a/c=0.55$, concreto 5% de microsílíce



Nota. Obsérvese en rojo un solo valor atípico determinado en la tabla 61.

Tabla 72

Valores estadísticos del concreto con 10% de microsílíce $a/c = 0.55$

Variable	Edad							
	(días)	N	Media	Desv.Est.	Mín.	Máx.	G	P
Permeabilidad (10^{-12} m/s)	28	5	0.3954	0.1020	0.2590	0.5150	1.34	0.732
Permeabilidad (10^{-12} m/s)	56	4	0.2353	0.1273	0.0460	0.3160	1.49	0.037
Permeabilidad (10^{-12} m/s)	100	3	0.09167	0.01595	0.08100	0.11000	1.15	0.180

Nota: elaboración propia.

Tabla 73

Valor atípico de permeabilidad-prueba de Grubbs

Variable	Edad (días)	Fila	Valor atípico
----------	-------------	------	---------------

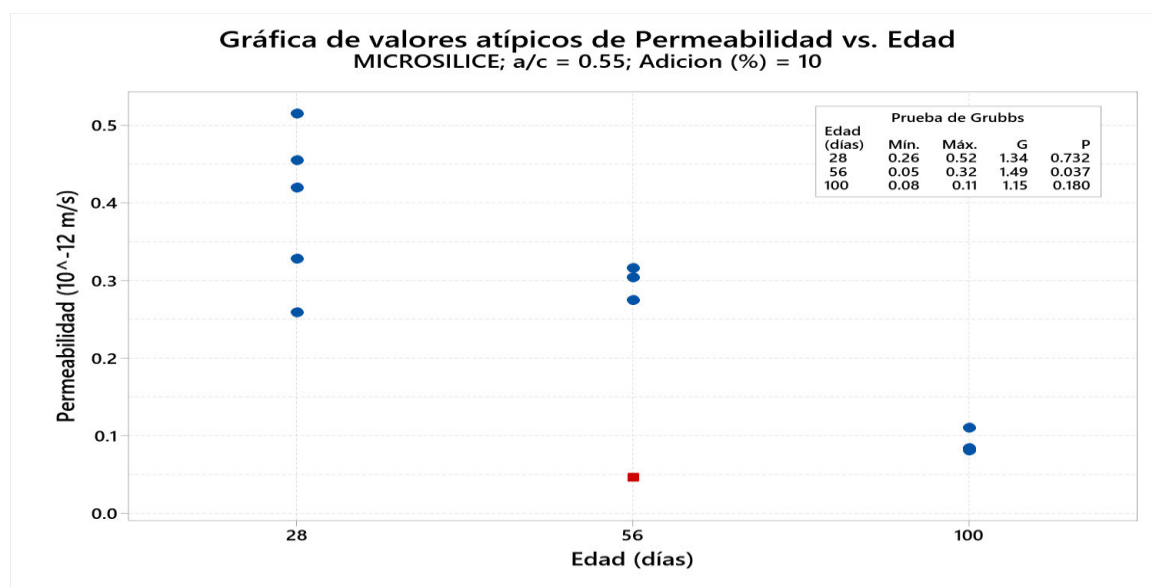
Permeabilidad (10^{-12} m/s)	56	107	0.046
---------------------------------	----	-----	-------

Nota: elaboración propia.

En la fila 107, en amarillo se resaltó el valor atípico obtenido mediante la prueba de Grubbs.

Figura 28

Valor atípico permeabilidad para $a/c=0.55$, concreto con 10% de microsílíce



Nota. Obsérvese en rojo un valor atípico.

Tabla 74

Valores estadísticos del concreto con 5% de microsílíce $a/c = 0.60$

Variable	Edad (días)	N	Media	Desv.Est.	Mín.	Máx.	G	P
Permeabilidad (10^{-12} m/s)	28	5	0.642	0.234	0.234	0.808	1.74	0.026
	56	5	0.5510	0.0576	0.4840	0.6290	1.35	0.694
	100	6	0.4170	0.0883	0.2920	0.5050	1.41	0.761

Nota: elaboración propia.

Tabla 75

Valor atípico de permeabilidad-prueba de grubbs

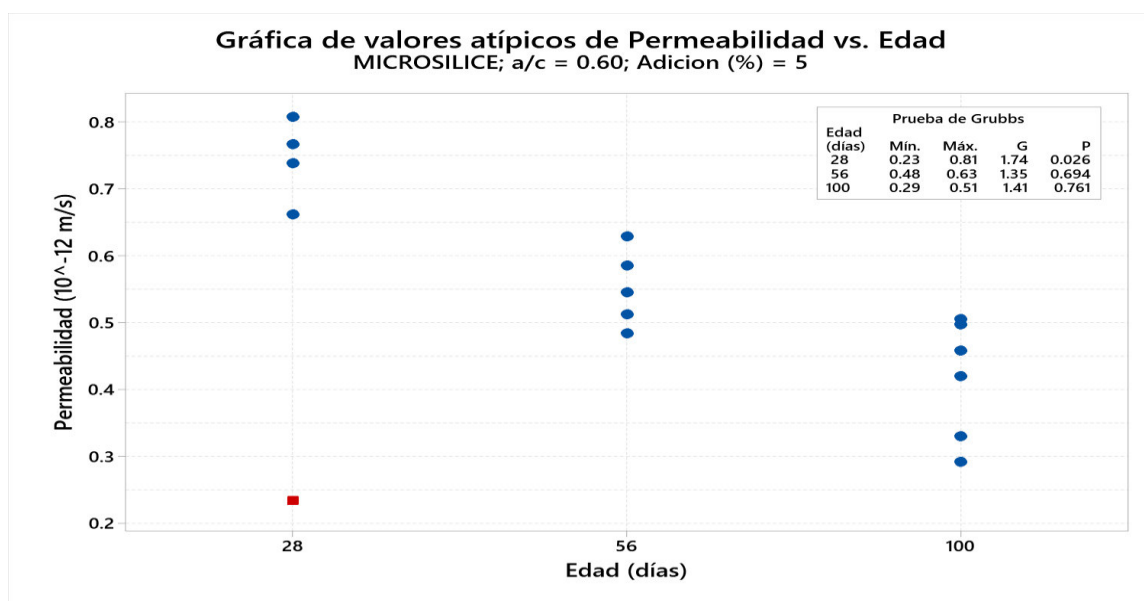
Variable	Edad (días)	Fila	Valor atípico
Permeabilidad (10^{-12} m/s)	28	114	0.234

Nota: elaboración propia.

En la fila 114, en amarillo se resaltó el valor atípico obtenido mediante la prueba de Grubbs

Figura 29

Valores atípicos de permeabilidad para $a/c = 0.60$, concreto microsílíce 5%



Nota. Obsérvese en rojo un valor atípico

Análisis de regresión lineal múltiple

Mediante el uso del Matlab y utilizando las variables de fabricación presentadas en la tabla 76, se buscó la ecuación de regresión múltiple lineal (MRL), que mejor se ajustase con la data de permeabilidad ,obtenida en forma experimental; previo análisis se encontraron ecuaciones con muy buenos factores de correlación, que permitirán determinar la Permeabilidad (10^{-12} m/s) del concreto a partir de los datos teóricos del diseño de mezcla tales como: Cemento (kg); Agua (kg); Arena (kg); Piedra (kg); Aditivo(kg); Edad (días).

Ecuación de regresión múltiple lineal; se presenta la ecuación que estima los valores de permeabilidad a partir de datos de la adición, cemento, agua, arena, piedra, aditivo y edad.

Ecuación de regresión múltiple lineal

Permeabilidad (10^{-12} m/s) = 1529 - 0.503 Cemento (kg) - 0.736 Adición (kg) - 1.554 Agua (kg) + 0.086 Arena (kg) - 1.194 Piedra (kg) - 1.124 Aditivo(kg) - 0.003015 Edad (días)

*Los materiales deben ser ingresados en kg

Tabla 76

Coefficientes de correlación de Regresión múltiple

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	1529	683	2.24	0.027	
Cemento (kg)	-0.503	0.223	-2.25	0.026	875475.69
Adición (kg)	-0.736	0.320	-2.30	0.023	136293.67
Agua (kg)	-1.554	0.696	-2.23	0.027	635174.19
Arena (kg)	0.086	0.466	0.19	0.853	393030.11
Piedra (kg)	-1.194	0.414	-2.88	0.005	369637.78
Aditivo(kg)	-1.124	0.548	-2.05	0.042	3230.88
Edad (días)	-0.003015	0.000246	-12.24	0.000	1.01

Nota. Obsérvese que de los valores obtenidos se pueden concluir que las variables que más inciden la estimación de la permeabilidad es el cemento, agua y la adición.

Tabla 77

Coefficientes de correlación

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.0861728	82.08%	81.13%	80.09%

Nota: elaboración propia.

Se alcanzó una correlación de 82.08% entre las variables de fabricación y la permeabilidad.

Tabla 78

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
---------------	-----------	------------------	------------------	----------------	----------------

Regresión	7	4.45702	0.63672	85.74	0.000
Cemento (kg)	1	0.03756	0.03756	5.06	0.026
Adición (kg)	1	0.03929	0.03929	5.29	0.023
Agua (kg)	1	0.03699	0.03699	4.98	0.027
Arena (kg)	1	0.00025	0.00025	0.03	0.853
Piedra (kg)	1	0.06180	0.06180	8.32	0.005
Aditivo(kg)	1	0.03128	0.03128	4.21	0.042
Edad (días)	1	1.11219	1.11219	149.78	0.000
Error	131	0.97277	0.00743		
Falta de ajuste	22	0.28556	0.01298	2.06	0.008
Error puro	109	0.68722	0.00630		
Total	138	5.42979			

Nota: elaboración propia.

La ecuación determinada tiene una correlación de 82.08%; haciendo el análisis para ajustar más la ecuación se realizó una segunda regresión la que se presenta a continuación.

Reajuste a la ecuacion de regresión lineal multiple

Ecuación de regresión reajustada

Permeabilidad (10^{-12} m/s) = 1841 - 0.604 Cemento (kg) - 0.882 Adición (kg) - 1.871 Agua (kg) - 0.008 Arena (kg) - 1.335 Piedra (kg) - 1.366 Aditivo(kg) - 0.002805 Edad (días)

Tabla 79

Coefficientes de correlación de Regresión múltiple

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	1841	549	3.35	0.001	
Cemento (kg)	-0.604	0.180	-3.37	0.001	862141.62
Adición (kg)	-0.882	0.257	-3.43	0.001	140062.85
Agua (kg)	-1.871	0.559	-3.34	0.001	659105.84
Arena (kg)	-0.008	0.379	-0.02	0.983	412558.00
Piedra (kg)	-1.335	0.329	-4.06	0.000	370804.17
Aditivo(kg)	-1.366	0.441	-3.10	0.002	3290.08
Edad (días)	-0.002805	0.000197	-14.24	0.000	1.01

Nota. Obsérvese que de los valores obtenidos se pueden concluir que las variables que más inciden la estimación de la permeabilidad es el cemento, agua y la adición.

Tabla 80

Coefficientes de correlación

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.0670143	88.71%	88.06%	87.18%

Nota: elaboración propia.

Se alcanzó una correlación de 88.71% entre las variables de fabricación y la permeabilidad.

Tabla 81*Análisis de Varianza*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	7	4.30439	0.614913	136.92	0.000
Cemento (kg)	1	0.05089	0.050887	11.33	0.001
Adición (kg)	1	0.05291	0.052911	11.78	0.001
Agua (kg)	1	0.05023	0.050232	11.19	0.001
Arena (kg)	1	0.00000	0.000002	0.00	0.983
Piedra (kg)	1	0.07393	0.073934	16.46	0.000
Aditivo(kg)	1	0.04307	0.043073	9.59	0.002
Edad (días)	1	0.91130	0.911297	202.92	0.000
Error	122	0.54789	0.004491		
Falta de ajuste	22	0.22609	0.010277	3.19	0.000
Error puro	100	0.32180	0.003218		
Total	129	4.85229			

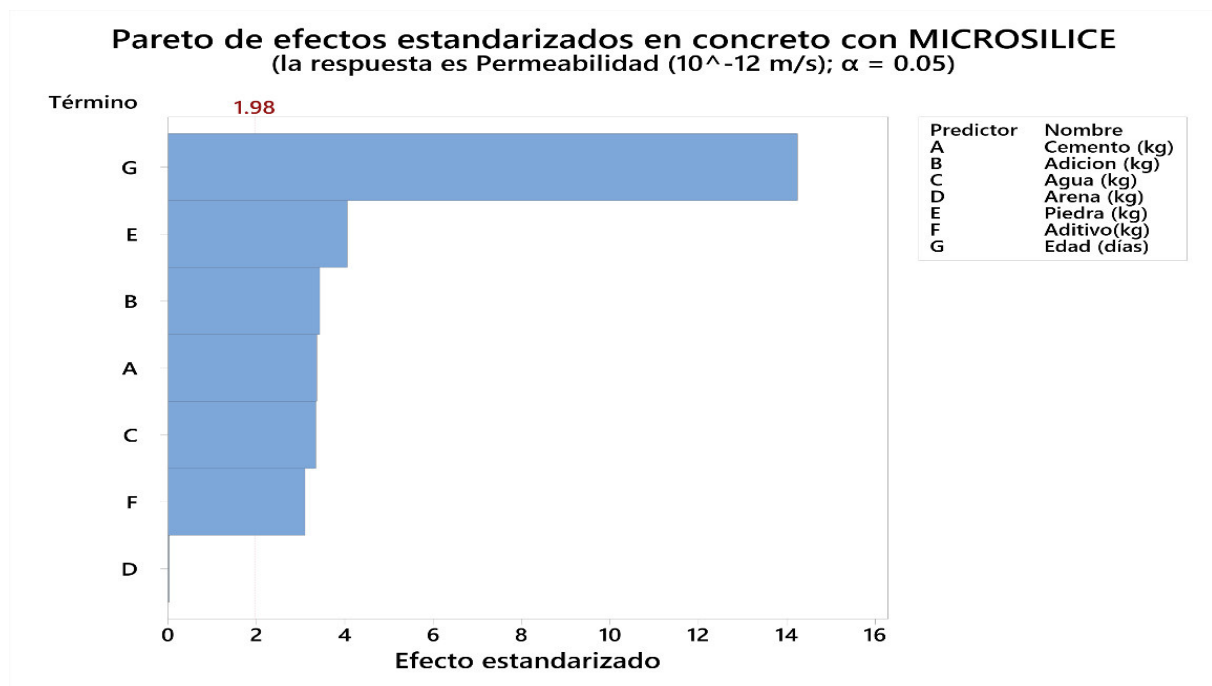
Se identificaron siete variables y se analizó la incidencia de ellas , se observa que las mayores incidencias en los coeficientes de permeabilidad se encuentran en la edad, el cemento así como en la cantidad de adición

En la siguiente figura N°30 , se muestra el diagrama de Pareto ,donde observamos que las variables de fabricación que más incidieron en la permeabilidad del concreto son: agua, adición, cemento, arena; y que las que menos incidencia tienen son piedra y el aditivo.

Figura 30

Diagrama de Pareto para las variables: cemento, adición, arena, agua, piedra, aditivo y edad

Nota: elaboración propia.



Aplicación de la ecuación de regresión múltiple lineal (MLR) para el cálculo de permeabilidad e índice de Durabilidad

Se presenta a continuación la permeabilidad obtenida en forma experimental KLAB y la permeabilidad calculada con la ecuación obtenida mediante MLR; asimismo se incorpora una relación entre resistencia a compresión del concreto sin adición f_0 respecto de la resistencia a compresión con adición f_i ; para asegurar la durabilidad del concreto. Según: Aref M. al-Swaidani (2022); la resistencia a compresión relativa entre concreto sin adición y con adición (f_0/f_i) menos la permeabilidad relativa $K_{\text{sin adición}}/K_{\text{con adición}}$ (K_0/K_i); deben ser mayores

a 1 para asegurar la durabilidad del concreto; en la tabla N.º 82 se presentan este índice de durabilidad para casos donde se conozca la resistencia con y sin adición.

$$f_i/f_o \geq K_i/K_o$$

Aplicando los datos de K_o (permeabilidad sin adición) y K_i (permeabilidad con microsíllice); obtenemos los valores de aproximación para cada a/c.

Tabla 82

Permeabilidad experimental y MLR -índice de durabilidad f_o/f_i

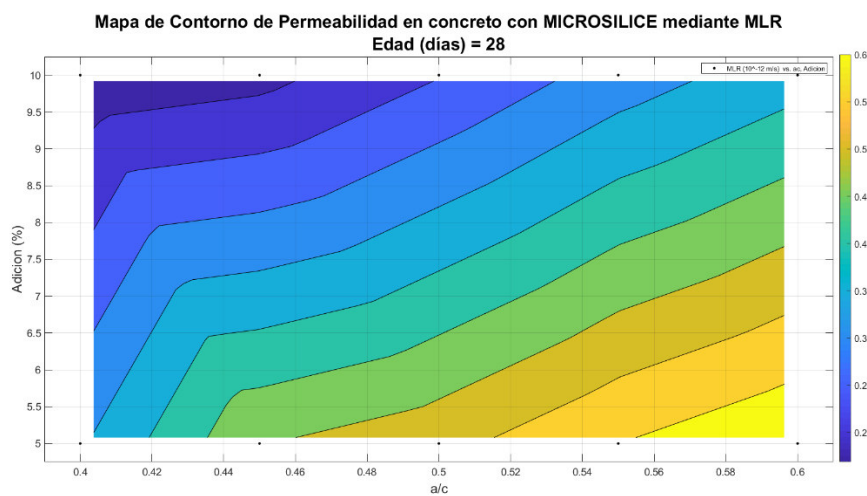
a/c	Adición (%)	Edad (días)	KLAB (10 ⁻¹² m/s)	KMLR (10 ⁻¹² m/s)	Permeabilidad Relativa K_o/K_i	$f_o/f_i \geq$
0.40	5	28	0.29880	0.34376	0.024776119	1.02477
0.40	5	56	0.26740	0.26522	0.022172471	1.02217
0.40	5	100	0.17567	0.14180	0.014566059	1.01456
0.40	10	28	0.12740	0.16230	0.010563847	1.01056
0.40	10	56	0.06425	0.08376	0.005327529	1.00532
0.40	10	100	0.02233	0.03966	0.001851852	1.001852
0.45	5	28	0.43725	0.49759	0.008287528	1.00828
0.45	5	56	0.42550	0.41905	0.008064822	1.00806
0.45	5	100	0.24967	0.29563	0.004732120	1.00473
0.45	10	28	0.16167	0.18264	0.003064190	1.00306
0.45	10	56	0.14267	0.10410	0.002704069	1.00270
0.45	10	100	0.04375	0.01932	0.000829227	1.00082
0.50	5	28	0.52480	0.53454	0.008008546	1.00800
0.50	5	56	0.52933	0.45600	0.008077725	1.00807
0.50	5	100	0.33460	0.33259	0.005106058	1.00510
0.50	10	28	0.21840	0.24730	0.003332825	1.00333
0.50	10	56	0.18225	0.16877	0.002781169	1.00278
0.50	10	100	0.06475	0.04535	0.000988097	1.00098
0.55	5	28	0.62783	0.59970	0.003493786	1.00349
0.55	5	56	0.52720	0.52116	0.002933779	1.00293
0.55	5	100	0.37575	0.39775	0.002090985	1.00209
0.55	10	28	0.36550	0.32186	0.002033945	1.00203
0.55	10	56	0.29833	0.24333	0.001660174	1.00166
0.55	10	100	0.09167	0.11991	0.000510109	1.00051
0.60	5	28	0.74375	0.64740	0.007313176	1.00731
0.60	5	56	0.55100	0.56886	0.005417896	1.00541
0.60	5	100	0.41700	0.44544	0.004100295	1.00410

0.60	10	28	0.35875	0.37979	0.003527532	1.00352
0.60	10	56	0.32550	0.30126	0.003200590	1.00320
0.60	10	100	0.06575	0.17784	0.000646509	1.00064

Nota: elaboración propia.

Figura 31

Mapa de contorno permeabilidad MLR con Microsílice ,28 días curado

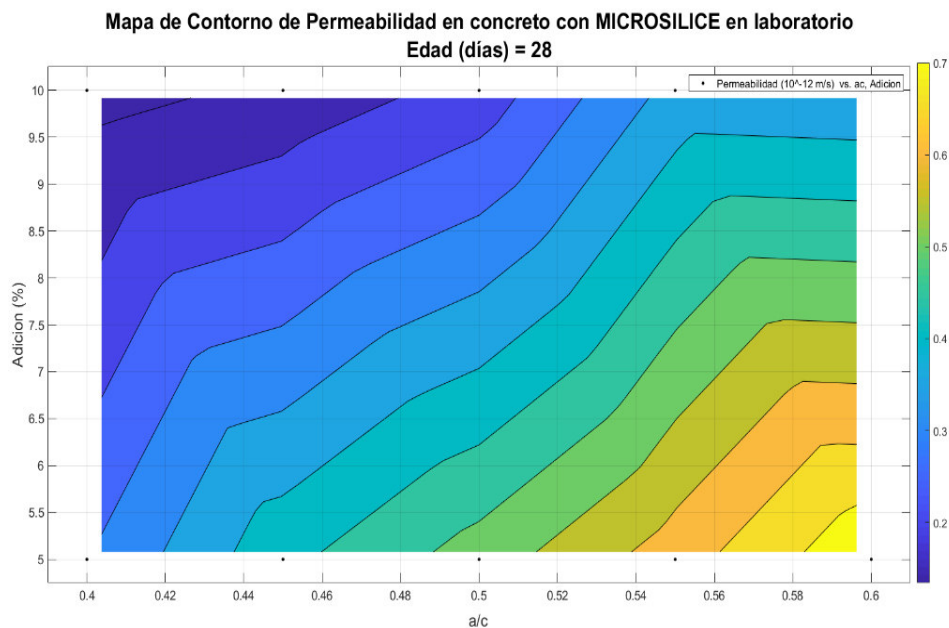


Nota: elaboración propia.

Figura 32

Mapa de contorno permeabilidad Laboratorio concreto con Microsílice, 28 días

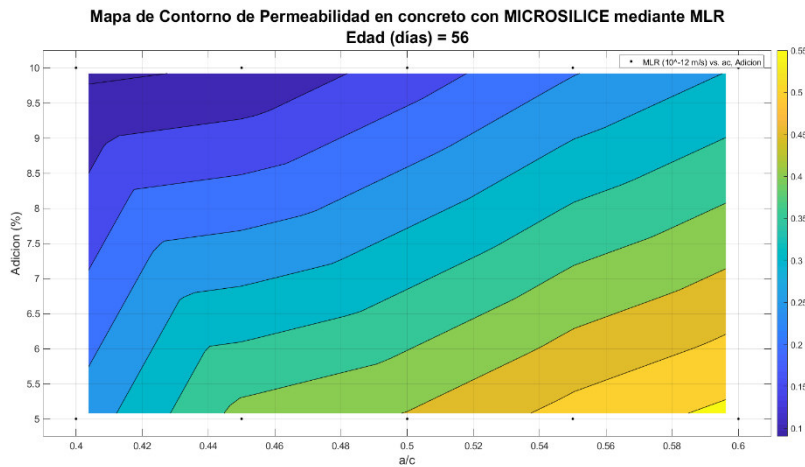
Nota: elaboración propia.



Estos mapas de contorno son de mucha utilidad para, poder decidir rápidamente la relación a/c y el contenido de microsílice recomendable para obtener un valor de permeabilidad. En las figuras N.º 32 y 33 los mapas se diferencian por la técnica utilizada en su construcción; la primera fue hecha con los datos experimentales de laboratorio y la segunda con la ecuación de regresión múltiple lineal presentada en pág. 118.

Figura 33

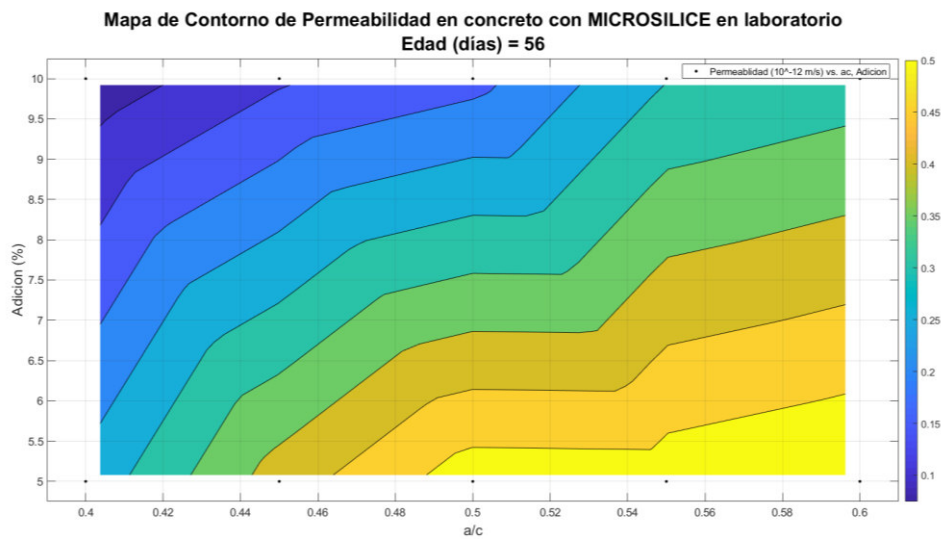
Mapa de contorno permeabilidad MLR concreto con Microsílice, 56 días



Nota: elaboración propia.

Figura 34

Mapa de contorno permeabilidad Laboratorio concreto con Microsílice, 56 días

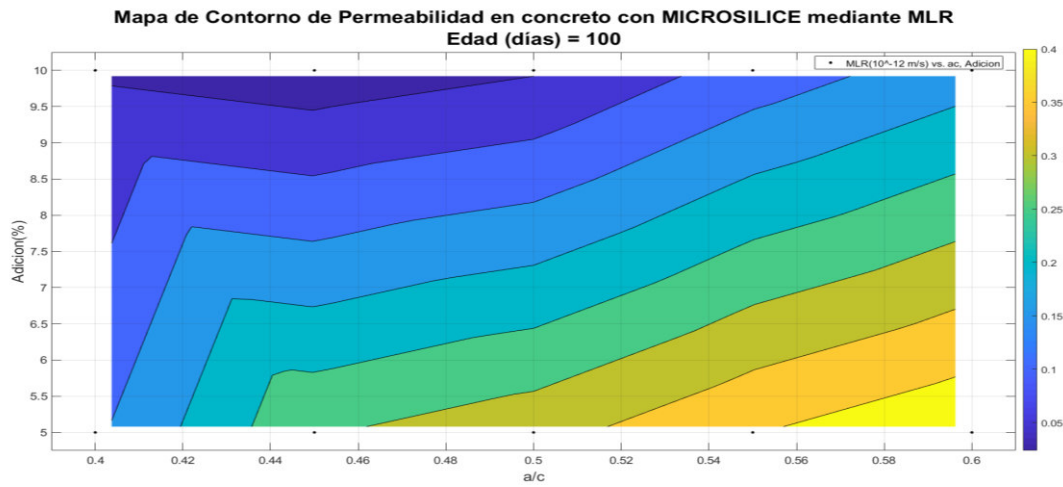


Nota: elaboración propia.

Algo similar a lo explicado en el ítem anterior con la diferencia de las edades de curado a 56 días. En las figuras N.º 34 y 35, los mapas se diferencian por la técnica utilizada en su construcción; la primera fue hecha con los datos experimentales de laboratorio y la segunda con la ecuación de regresión múltiple lineal presentada en pág. 118.

Figura 35

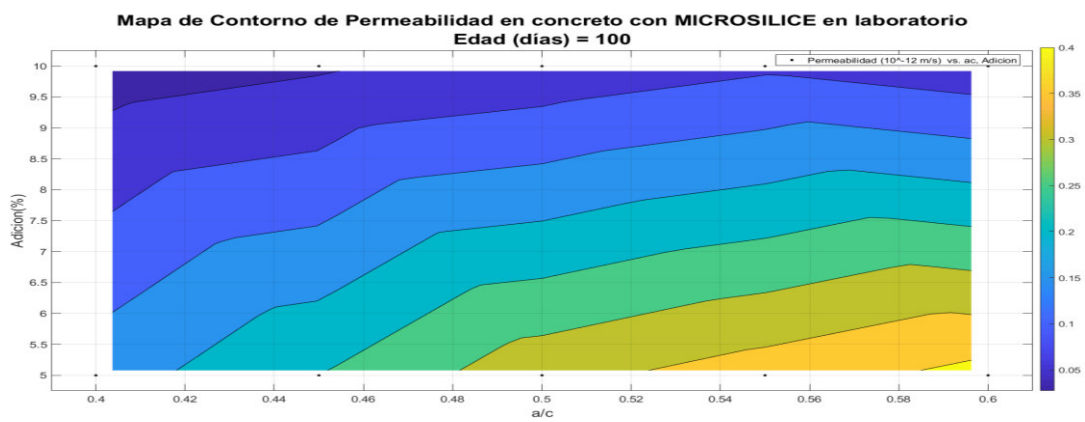
Mapa de contorno permeabilidad MLR concreto con Microsilice, 100 días



Nota: elaboración propia.

Figura 36

Mapa de contorno permeabilidad Laboratorio concreto con Microsilice, 100 días

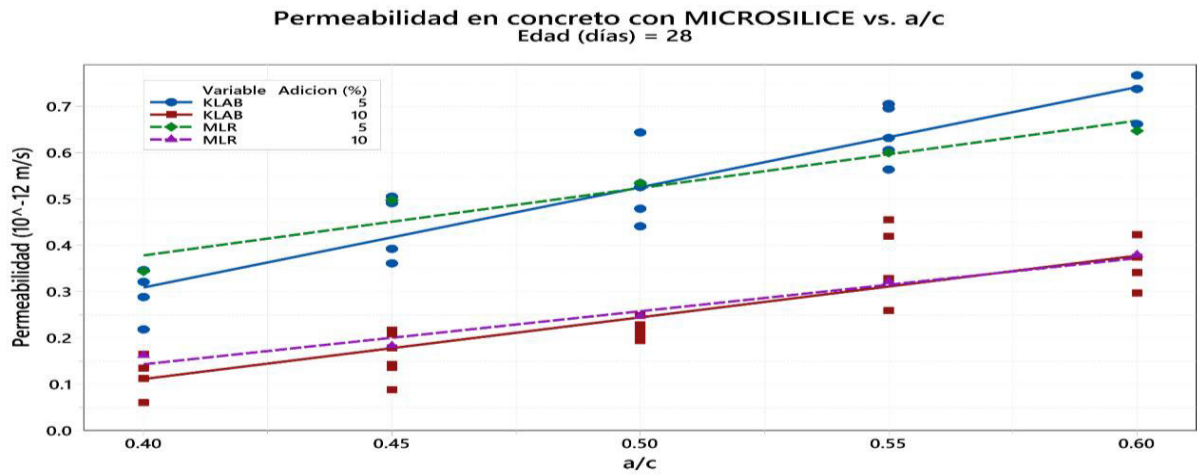


Nota: elaboración propia.

Estos mapas de contorno son referenciales a edades de 100 días de curado.

Figura 37

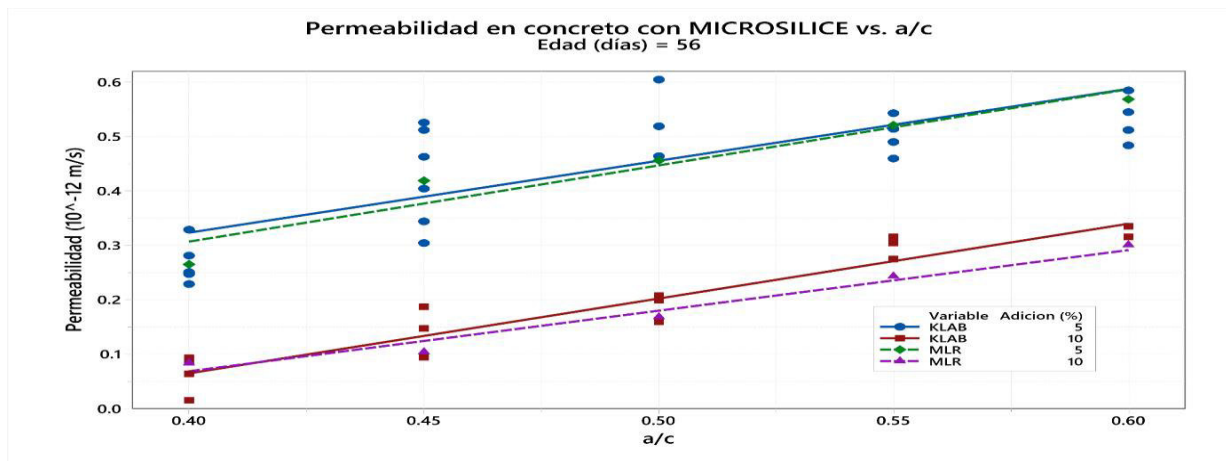
Graficas comparativas de Permeabilidad con MLR y permeabilidad experimental Vs relaciones agua cemento a 28 días



Nota: elaboración propia.

Figura 38

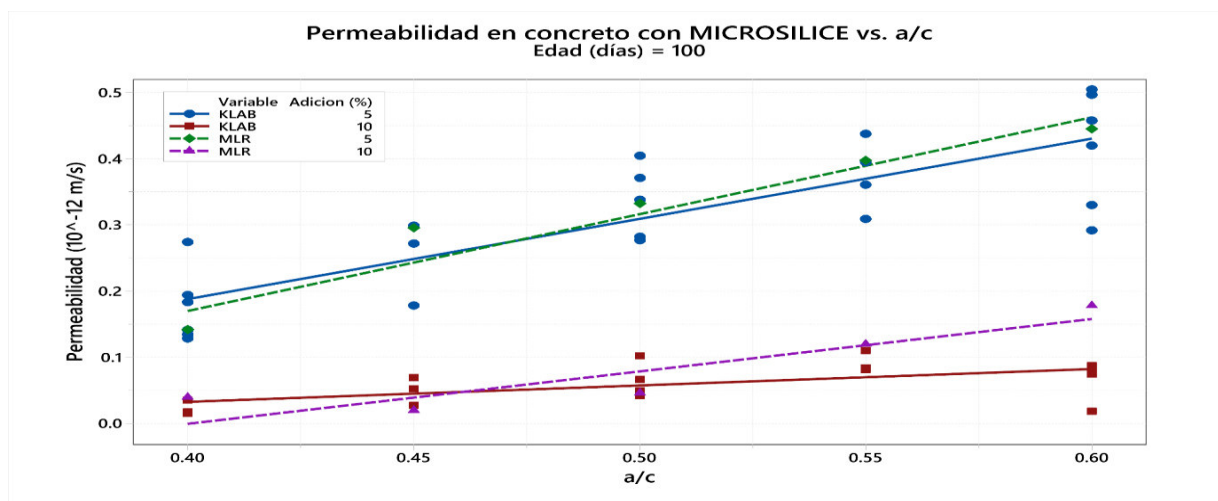
Graficas comparativas de Permeabilidad con MLR y permeabilidad experimental Vs relaciones agua cemento a 56 días



Nota: elaboración propia.

Figura 39

Graficas comparativas de Permeabilidad con MLR y permeabilidad experimental Vs relaciones agua cemento a 100 días



En las Figuras N.º 36, 37 y 38; se puede observar la aproximación de los valores de permeabilidad calculados en forma experimental y en laboratorio; las mejores aproximaciones se observan a los 56 días y con 5% de microsilíce; asimismo para 10 % de adición de microsilíce se observaron los menores valores de permeabilidad, en todos los casos; ambas graficas (laboratorio y MLR) son muy aproximadas, y con valores muy bajos de permeabilidad.

Permeabilidad del concreto con adición de puzolana:

En la siguiente tabla N°83 se presentan 86 datos del concreto con adición de puzolana, considerados para la evaluación de los resultados de permeabilidad en el concreto; se consignan también las variables de fabricación tales como: puzolana, cemento, agua, arena, piedra, aditivo, edad; que serán consideradas para el análisis de correlación múltiple lineal, del conjunto de datos para las diferentes relaciones a/c y edades; además usando esta data se obtuvo información valiosa de cuáles son las variables de fabricación que tienen mayor incidencia en los valores de la permeabilidad .

Tabla 83

Variables de fabricación consideradas en concreto con adición de Puzolana

Nº	A/C	Adición (%)	Cemento (kg)	Adición (kg)	Agua (kg)	Arena (kg)	Piedra (kg)	Aditivo (kg)	Edad (días)	Permeabilidad (10 ⁻¹² m/s)
----	-----	-------------	--------------	--------------	-----------	------------	-------------	--------------	-------------	---------------------------------------

1	0.40	10	342.00	38.00	152.0 0	980.16	908.1 4	6.46	28	0.2290
2	0.40	10	342.00	38.00	152.0 0	980.16	908.1 4	6.46	28	0.2460
3	0.40	10	342.00	38.00	152.0 0	980.16	908.1 4	6.46	28	0.3370
4	0.40	10	342.00	38.00	152.0 0	980.16	908.1 4	6.46	56	0.1080
5	0.40	10	342.00	38.00	152.0 0	980.16	908.1 4	6.46	56	0.1740
6	0.40	10	342.00	38.00	152.0 0	980.16	908.1 4	6.46	56	0.2070
7	0.40	10	342.00	38.00	152.0 0	980.16	908.1 4	6.46	56	0.2970
8	0.40	15	323.00	57.00	152.0 0	978.84	906.9 2	6.46	28	0.2190
9	0.40	15	323.00	57.00	152.0 0	978.84	906.9 2	6.46	28	0.2810
10	0.40	15	323.00	57.00	152.0 0	978.84	906.9 2	6.46	28	0.2890
11	0.40	15	323.00	57.00	152.0 0	978.84	906.9 2	6.46	56	0.1300
12	0.40	15	323.00	57.00	152.0 0	978.84	906.9 2	6.46	56	0.1350
13	0.40	15	323.00	57.00	152.0 0	978.84	906.9 2	6.46	56	0.1480
14	0.40	15	323.00	57.00	152.0 0	978.84	906.9 2	6.46	56	0.1500
15	0.40	20	304.00	76.00	152.0 0	977.52	905.6 9	6.46	28	0.2230
16	0.40	20	304.00	76.00	152.0 0	977.52	905.6 9	6.46	28	0.2780
17	0.40	20	304.00	76.00	152.0 0	977.52	905.6 9	6.46	28	0.2970
18	0.40	20	304.00	76.00	152.0 0	977.52	905.6 9	6.46	28	0.3470
19	0.40	20	304.00	76.00	152.0 0	977.52	905.6 9	6.46	56	0.0760
20	0.40	20	304.00	76.00	152.0 0	977.52	905.6 9	6.46	56	0.1070
21	0.40	20	304.00	76.00	152.0 0	977.52	905.6 9	6.46	56	0.1170
22	0.40	20	304.00	76.00	152.0 0	977.52	905.6 9	6.46	56	0.1220
23	0.45	10	324.00	36.00	162.0 0	976.20	904.4 7	5.76	28	0.3720
24	0.45	10	324.00	36.00	162.0 0	976.20	904.4 7	5.76	28	0.4770
25	0.45	10	324.00	36.00	162.0 0	976.20	904.4 7	5.76	28	0.5170
26	0.45	10	324.00	36.00	162.0 0	976.20	904.4 7	5.76	28	0.6510
27	0.45	10	324.00	36.00	162.0 0	976.20	904.4 7	5.76	56	0.1810

28	0.45	10	324.00	36.00	162.0 0	976.20	904.4 7	5.76	56	0.2380
29	0.45	10	324.00	36.00	162.0 0	976.20	904.4 7	5.76	56	0.3040
30	0.45	15	306.00	54.00	162.0 0	974.95	903.3 1	5.76	28	0.2770
31	0.45	15	306.00	54.00	162.0 0	974.95	903.3 1	5.76	28	0.4220
32	0.45	15	306.00	54.00	162.0 0	974.95	903.3 1	5.76	28	0.5290
33	0.45	15	306.00	54.00	162.0 0	974.95	903.3 1	5.76	56	0.1720
34	0.45	15	306.00	54.00	162.0 0	974.95	903.3 1	5.76	56	0.2050
35	0.45	15	306.00	54.00	162.0 0	974.95	903.3 1	5.76	56	0.2050
36	0.45	15	306.00	54.00	162.0 0	974.95	903.3 1	5.76	56	0.3240
37	0.45	20	288.00	72.00	162.0 0	973.70	902.1 5	5.76	28	0.3780
38	0.45	20	288.00	72.00	162.0 0	973.70	902.1 5	5.76	28	0.3990
39	0.45	20	288.00	72.00	162.0 0	973.70	902.1 5	5.76	28	0.4270
40	0.45	20	288.00	72.00	162.0 0	973.70	902.1 5	5.76	56	0.2020
41	0.45	20	288.00	72.00	162.0 0	973.70	902.1 5	5.76	56	0.2160
42	0.45	20	288.00	72.00	162.0 0	973.70	902.1 5	5.76	56	0.2610
43	0.45	20	288.00	72.00	162.0 0	973.70	902.1 5	5.76	56	0.3010
44	0.50	10	288.00	32.00	160.0 0	1017.1 0	905.3 6	5.12	28	0.4810
45	0.50	10	288.00	32.00	160.0 0	1017.1 0	905.3 6	5.12	28	0.5190
46	0.50	10	288.00	32.00	160.0 0	1017.1 0	905.3 6	5.12	28	0.6200
47	0.50	10	288.00	32.00	160.0 0	1017.1 0	905.3 6	5.12	28	0.6860
48	0.50	10	288.00	32.00	160.0 0	1017.1 0	905.3 6	5.12	56	0.2880
49	0.50	10	288.00	32.00	160.0 0	1017.1 0	905.3 6	5.12	56	0.3430
50	0.50	10	288.00	32.00	160.0 0	1017.1 0	905.3 6	5.12	56	0.3850
51	0.50	15	272.00	48.00	160.0 0	1016.0 0	904.3 6	5.12	28	0.3470
52	0.50	15	272.00	48.00	160.0 0	1016.0 0	904.3 6	5.12	28	0.4530
53	0.50	15	272.00	48.00	160.0 0	1016.0 0	904.3 6	5.12	28	0.4800
54	0.50	15	272.00	48.00	160.0 0	1016.0 0	904.3 6	5.12	28	0.6610

55	0.50	15	272.00	48.00	160.0	1016.0	904.3	5.12	56	0.2300
					0	0	6			
56	0.50	15	272.00	48.00	160.0	1016.0	904.3	5.12	56	0.2440
					0	0	6			
57	0.50	15	272.00	48.00	160.0	1016.0	904.3	5.12	56	0.2470
					0	0	6			
58	0.50	20	256.00	64.00	160.0	1014.9	903.3	5.12	28	0.5110
					0	0	5			
59	0.50	20	256.00	64.00	160.0	1014.9	903.3	5.12	28	0.8450
					0	0	5			
60	0.50	20	256.00	64.00	160.0	1014.9	903.3	5.12	28	1.1960
					0	0	5			
61	0.50	20	256.00	64.00	160.0	1014.9	903.3	5.12	56	0.3220
					0	0	5			
62	0.50	20	256.00	64.00	160.0	1014.9	903.3	5.12	56	0.3220
					0	0	5			
63	0.50	20	256.00	64.00	160.0	1014.9	903.3	5.12	56	0.3300
					0	0	5			
64	0.50	20	256.00	64.00	160.0	1014.9	903.3	5.12	56	0.4060
					0	0	5			
65	0.55	10	270.00	30.00	165.0	1019.7	907.6	4.80	28	0.6160
					0	0	5			
66	0.55	10	270.00	30.00	165.0	1019.7	907.6	4.80	28	0.7500
					0	0	5			
67	0.55	10	270.00	30.00	165.0	1019.7	907.6	4.80	28	0.8070
					0	0	5			
68	0.55	10	270.00	30.00	165.0	1019.7	907.6	4.80	28	1.0350
					0	0	5			
69	0.55	10	270.00	30.00	165.0	1019.7	907.6	4.80	56	0.5870
					0	0	5			
70	0.55	10	270.00	30.00	165.0	1019.7	907.6	4.80	56	0.6500
					0	0	5			
71	0.55	10	270.00	30.00	165.0	1019.7	907.6	4.80	56	0.6750
					0	0	5			
72	0.55	10	270.00	30.00	165.0	1019.7	907.6	4.80	56	1.0130
					0	0	5			
73	0.55	15	255.00	45.00	165.0	1018.7	906.7	4.80	28	0.5980
					0	0	0			
74	0.55	15	255.00	45.00	165.0	1018.7	906.7	4.80	28	0.6260
					0	0	0			
75	0.55	15	255.00	45.00	165.0	1018.7	906.7	4.80	28	0.8190
					0	0	0			
76	0.55	15	255.00	45.00	165.0	1018.7	906.7	4.80	28	0.9060
					0	0	0			
77	0.55	15	255.00	45.00	165.0	1018.7	906.7	4.80	56	0.4450
					0	0	0			
78	0.55	15	255.00	45.00	165.0	1018.7	906.7	4.80	56	0.5400
					0	0	0			
79	0.55	15	255.00	45.00	165.0	1018.7	906.7	4.80	56	0.5440
					0	0	0			
80	0.55	20	240.00	60.00	165.0	1017.6	905.7	4.80	28	0.8670
					0	0	6			
81	0.55	20	240.00	60.00	165.0	1017.6	905.7	4.80	28	0.9400
					0	0	6			

82	0.55	20	240.00	60.00	165.0	1017.6	905.7	4.80	28	1.0520
					0	0	6			
83	0.55	20	240.00	60.00	165.0	1017.6	905.7	4.80	28	1.0880
					0	0	6			
84	0.55	20	240.00	60.00	165.0	1017.6	905.7	4.80	56	0.6420
					0	0	6			
85	0.55	20	240.00	60.00	165.0	1017.6	905.7	4.80	56	0.6730
					0	0	6			
86	0.55	20	240.00	60.00	165.0	1017.6	905.7	4.80	56	0.7560
					0	0	6			

Nota. Resaltado en Amarillo se muestran los valores atípicos calculados con la prueba de

Grubbs

Análisis de valores atípicos

El análisis de valores atípicos se realizó a todo el conjunto de 86 datos, utilizando el test de Grubbs; para el análisis se consideraron grupos correspondientes a la misma relación agua cemento; por razones prácticas en las siguientes figuras y tablas se reportan solo aquellos donde se identificaron valores atípicos.

Tabla 84

Valores estadísticos del concreto con 20% de puzolana y $a/c = 0.50$; $N=7$

Variable	Edad (días)	N	Media	Desv.Est.	Mín.	Máx.	G	P
Permeabilidad (10^{-12} m/s)	28	3	0.851	0.343	0.511	1.196	1.01	0.973
	56	4	0.3450	0.0408	0.3220	0.4060	1.49	0.017

Nota: elaboración propia.

Tabla 85

Valores atípicos en el concreto con 20% puzolana y $a/c = 0.50$

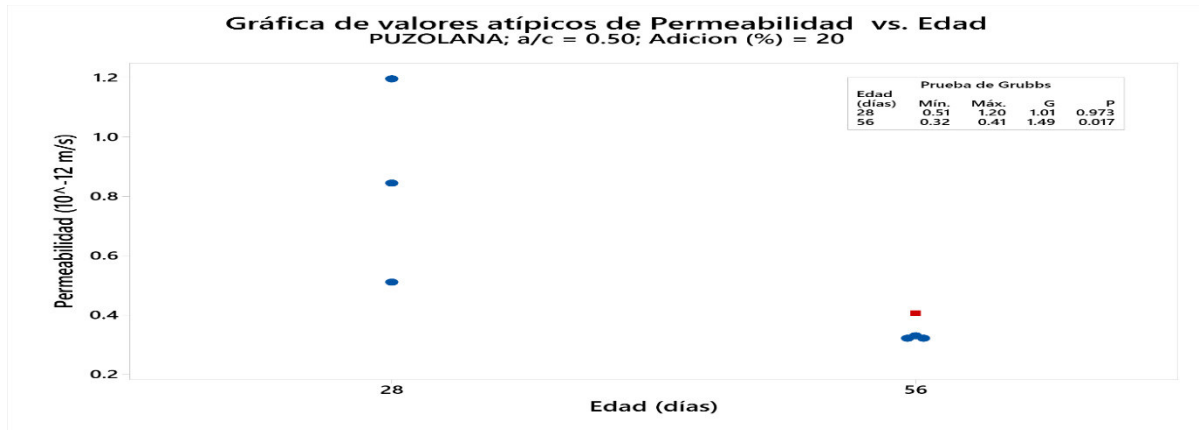
Variable	Edad (días)	Fila	Valor atípico
Permeabilidad (10^{-12} m/s)	56	64	0.406

Nota: elaboración propia.

En la fila 64 en amarillo se resaltó el valor atípico obtenido mediante la prueba de Grubbs

Figura 40

Valores atípicos de permeabilidad concreto 20% puzolana y a/c =0.50



Nota: elaboración propia.

Análisis de regresión lineal múltiple

Mediante el uso del Matlab y utilizando las variables de fabricación presentadas en la tabla 83, se buscó la ecuación de regresión múltiple lineal (MRL), que mejor se ajustase con la data de permeabilidad ,obtenida en forma experimental; previo análisis se encontraron ecuaciones con muy buenos factores de correlación, que permitirán determinar la Permeabilidad (10^{-12} m/s) del concreto a partir de los datos teóricos del diseño de mezcla tales como: Cemento (kg); Agua (kg); Arena (kg); Piedra (kg); Aditivo(kg); Edad (días).

Ecuación de regresión múltiple lineal; se presenta la ecuación que estima los valores de permeabilidad a partir de datos de la adición, cemento, agua, arena, piedra y edad

Ecuación de regresión múltiple lineal

$$\begin{aligned} \text{Permeabilidad } (10^{-12} \text{ m/s}) &= 2355 - 0.451 \text{ Cemento (kg)} - 0.461 \text{ Adición (kg)} \\ &- 8.75 \text{ Agua (kg)} - 2.67 \text{ Arena (kg)} + 2.74 \text{ Piedra (kg)} \\ &- 111.5 \text{ Aditivo(kg)} - 0.007410 \text{ Edad (días)} \end{aligned}$$

Los materiales deben ser ingresados en kg.

Tabla 86

Coefficientes de correlación de Regresión múltiple

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	2355	2152	1.09	0.277	
Cemento (kg)	-0.451	0.693	-0.65	0.517	2348665.97
Adición (kg)	-0.461	0.800	-0.58	0.566	781409.55
Agua (kg)	-8.75	3.14	-2.79	0.007	1278408.57
Arena (kg)	-2.67	1.05	-2.55	0.013	2464818.63
Piedra (kg)	2.74	1.24	2.20	0.031	26314.80
Aditivo(kg)	-111.5	33.4	-3.34	0.001	2516252.33
Edad (días)	-0.007410	0.000973	-7.62	0.000	1.01

Nota: elaboración propia.

La ecuación de regresión múltiple lineal utiliza los coeficientes especificados en esta tabla

Tabla 87

Coefficientes de correlación

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.125099	79.76%	77.93%	75.12%

Nota: elaboración propia.

El coeficiente de correlación menor a 80% se puede mejorar con mayor cantidad de datos

Tabla 88

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	7	4.75014	0.678591	43.36	0.000
Cemento (kg)	1	0.00662	0.006617	0.42	0.517
Adición (kg)	1	0.00520	0.005196	0.33	0.566
Agua (kg)	1	0.12194	0.121938	7.79	0.007
Arena (kg)	1	0.10211	0.102113	6.52	0.013
Piedra (kg)	1	0.07585	0.075850	4.85	0.031
Aditivo(kg)	1	0.17411	0.174113	11.13	0.001
Edad (días)	1	0.90793	0.907934	58.02	0.000
Error	77	1.20504	0.015650		

Falta de ajuste	16	0.43744	0.027340	2.17	0.016
Error puro	61	0.76760	0.012584		
Total	84	5.95518			

Nota: elaboración propia.

Tabla 89

Ajustes y diagnósticos para observaciones poco común

Obs	Permeabilidad (10 ⁻¹² m/s)	Ajuste	Resid	Resid est.	
59	0.8450	0.5889	0.2561	2.17	R
60	1.1960	0.5889	0.6071	5.14	R
71	1.0130	0.6279	0.3851	3.22	R

*Residuo grande R

Nota: elaboración propia.

Reajuste a la ecuación de regresión lineal múltiple

Ecuación de regresión

Permeabilidad (10⁻¹² m/s) = 4571 - 1.216 Cemento (kg) - 1.351 Adición (kg)
 - 10.27 Agua (kg) - 3.313 Arena (kg) + 1.494 Piedra (kg)
 - 100.8 Aditivo(kg) - 0.006937 Edad (días)

Tabla 90

Coefficientes de correlación de Regresión múltiple

Término	Coef	EE del coef.	ValorT	Valorp	FIV
Constante	4571	1536	2.98	0.004	
Cemento (kg)	-1.216	0.497	-2.44	0.017	2478981.27
Adición (kg)	-1.351	0.575	-2.35	0.021	820980.23
Agua (kg)	-10.27	2.17	-4.73	0.000	1283345.95
Arena (kg)	-3.313	0.728	-4.55	0.000	2449328.28
Piedra (kg)	1.494	0.886	1.69	0.096	26908.84
Aditivo(kg)	-100.8	23.0	-4.38	0.000	2468387.08
Edad (días)	-	0.000682	-10.17	0.000	1.01
	0.006937				

Nota: elaboración propia.

Tabla 91

Coefficientes de correlación de Regresión múltiple

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.0858427	88.80%	87.74%	86.17%

Nota. Se alcanzó una correlación de 88.8% para el concreto con puzolana, el ajuste encontrado es mucho mejor que el encontrado para permeabilidad del concreto con metacaolín.

Tabla 92

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	7	4.32255	0.617507	83.80	0.000
Cemento (kg)	1	0.04401	0.044009	5.97	0.017
Adición (kg)	1	0.04073	0.040730	5.53	0.021
Agua (kg)	1	0.16487	0.164872	22.37	0.000
Arena (kg)	1	0.15248	0.152481	20.69	0.000
Piedra (kg)	1	0.02095	0.020946	2.84	0.096
Aditivo(kg)	1	0.14120	0.141200	19.16	0.000
Edad (días)	1	0.76225	0.762254	103.44	0.000
Error	74	0.54530	0.007369		
Falta de ajuste	16	0.11821	0.007388	1.00	0.466
Error puro	58	0.42710	0.007364		
Total	81	4.86786			

Nota: elaboración propia.

Tabla 93

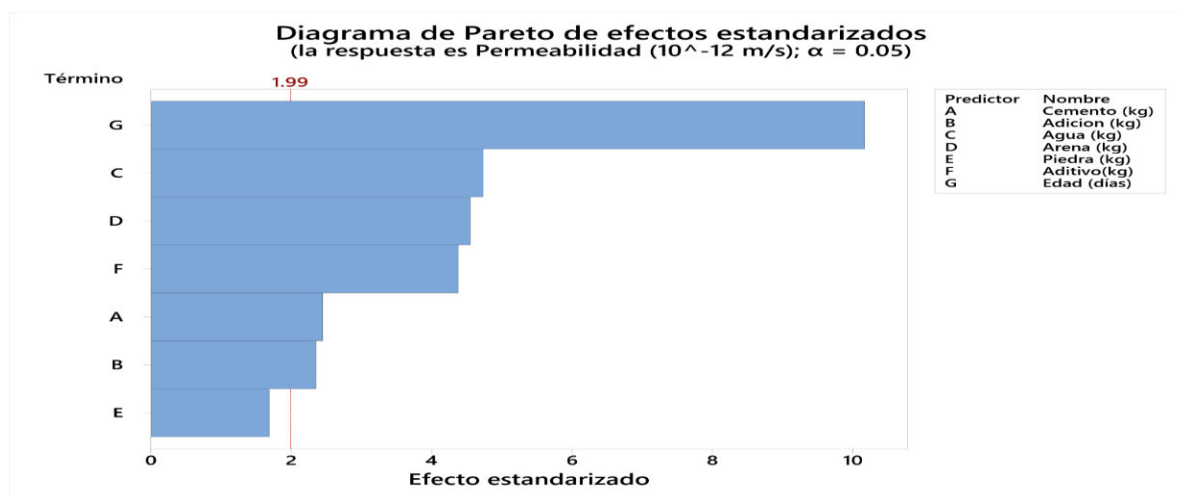
Ajustes y diagnósticos para observaciones poco común

Obs	Permeabilidad (10^{-12} m/s)	Ajuste	Resid	Resid est.	
26	0.6510	0.4580	0.1930	2.36	R
47	0.6860	0.5223	0.1637	2.02	R
51	0.3470	0.5140	-0.1670	-2.02	R
62	0.6160	0.8414	-0.2254	-2.75	R
65	1.0350	0.8414	0.1936	2.36	R
72	0.9060	0.7114	0.1946	2.44	R
79	1.0880	0.9277	0.1603	2.01	R

Nota: elaboración propia.

Figura 41

Diagrama de Pareto para las variables: cemento, adición, arena, agua, piedra, aditivo y edad



Nota: elaboración propia.

Mediante el diagrama de Pareto en la Figura N.º 40 observamos que las variables de fabricación que más incidieron en la permeabilidad del concreto son: agua, adición, cemento, arena

Aplicación de la ecuación de regresión múltiple lineal (MLR) para el cálculo de permeabilidad, e índice de durabilidad

Tabla 94

Ajustes y diagnósticos para observaciones poco común Permeabilidad-índice de durabilidad

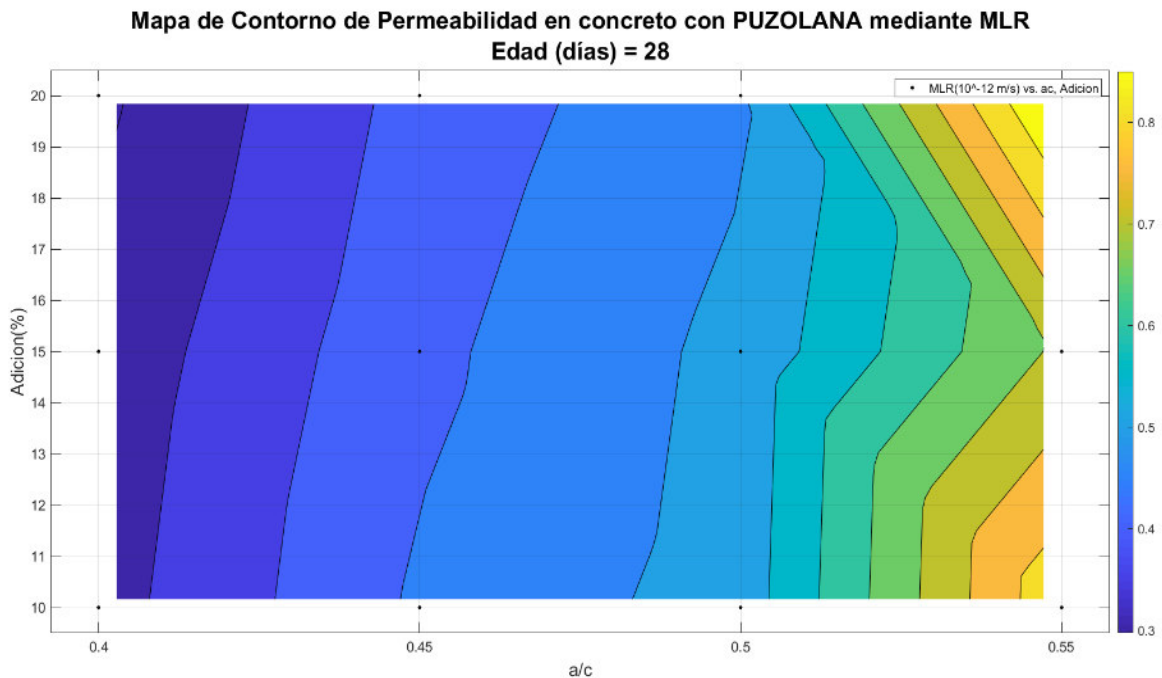
a/c	Adición n (%)	Edad (días)	KLAB (10^{-12} m/s)	KMLR 10^{-12} m/s	Ko/Ki	fo/fi \geq
0.40	10	28	0.27067	0.33013	0.022443339	1.022443
0.40	10	56	0.19650	0.13589	0.016293532	1.016294
0.40	15	28	0.26300	0.31728	0.021807629	1.021808
0.40	15	56	0.14075	0.12305	0.011670813	1.011671
0.40	20	28	0.28625	0.28949	0.023735489	1.023735
0.40	20	56	0.10550	0.09526	0.008747927	1.008748
0.45	10	28	0.50425	0.45804	0.009555743	1.009557
0.45	10	56	0.24100	0.26381	0.004567854	1.004568
0.45	15	28	0.40933	0.43784	0.007758403	1.007758
0.45	15	56	0.22650	0.24360	0.004293025	1.004293
0.45	20	28	0.40133	0.41763	0.007606773	1.007607
0.45	20	56	0.24500	0.22340	0.004643669	1.004644
0.50	10	28	0.57650	0.52229	0.008797497	1.008797
0.50	10	56	0.33867	0.32806	0.005168116	1.005168
0.50	15	28	0.48525	0.51400	0.007405005	1.007405
0.50	15	56	0.24033	0.31977	0.003667531	1.003668

0.50	20	28	0.51100	0.49076	0.007797955	1.007798
0.50	20	56	0.32467	0.29653	0.004954474	1.004954
0.55	10	28	0.80200	0.84143	0.004462994	1.004463
0.55	10	56	0.63733	0.64720	0.003546652	1.003547
0.55	15	28	0.73725	0.71144	0.004102671	1.004103
0.55	15	56	0.50967	0.51721	0.002836208	1.002836
0.55	20	28	0.98675	0.92771	0.005491096	1.005491
0.55	20	56	0.69033	0.73348	0.003841588	1.003842

Nota: elaboración propia.

Figura 42

Mapa de contorno de permeabilidad en concreto con Puzolana Mediante MLR-28 días

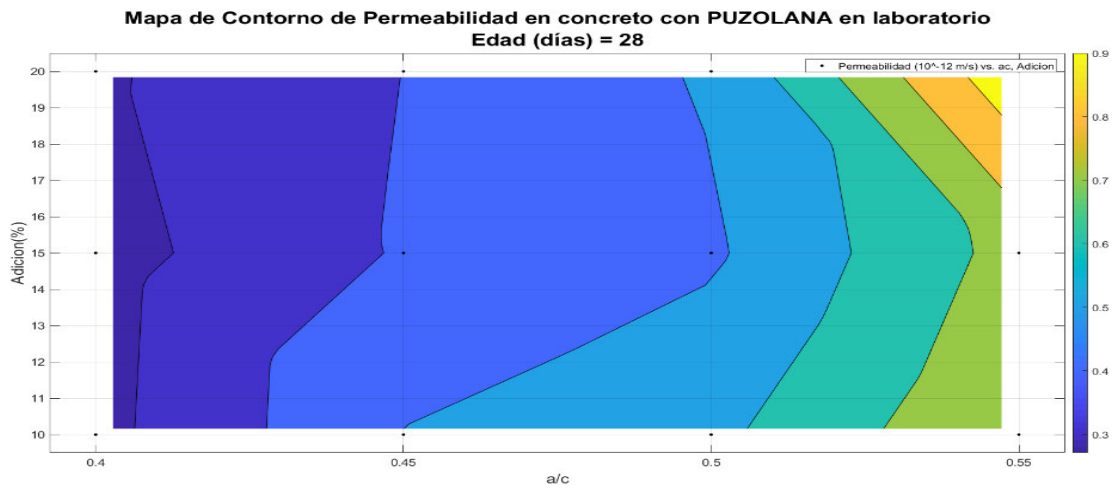


Nota: elaboración propia.

Se elabora utilizando la ecuación obtenida mediante regresión lineal múltiple para determinar la permeabilidad y considerando los diferentes a/c; y contenidos de adición.

Figura 43

Mapa de contorno de permeabilidad en laboratorio con puzolana edad 28 días

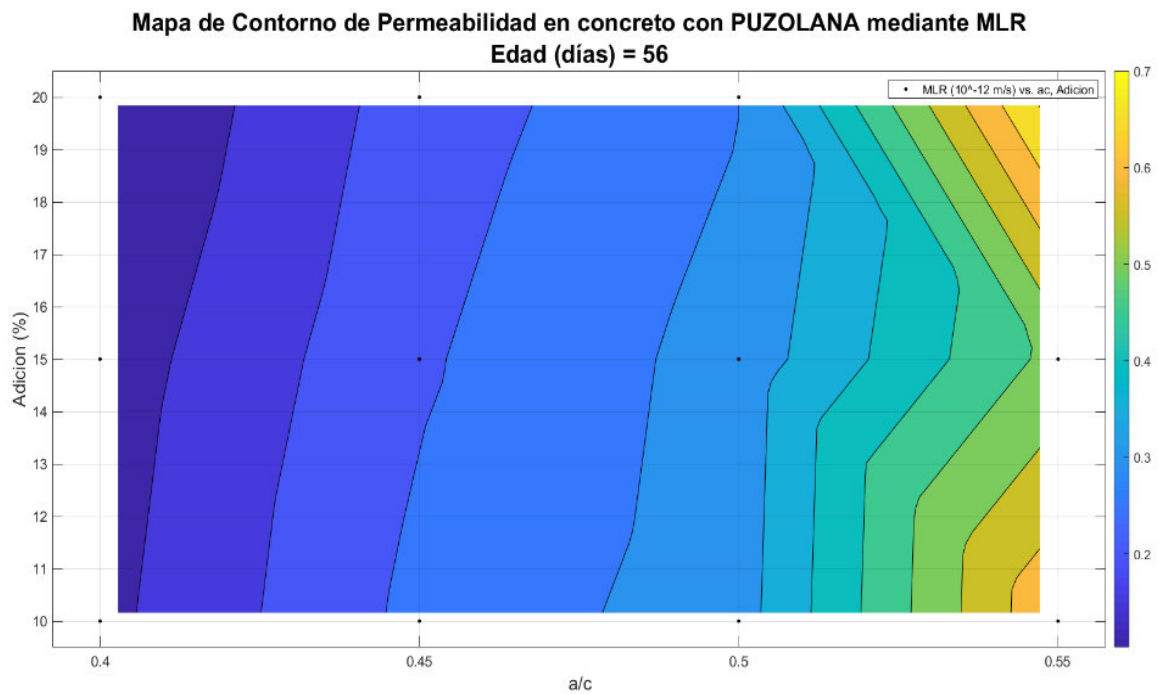


Nota: elaboración propia.

Se elabora utilizando los valores experimentales de permeabilidad y considerando los diferentes a/c; y contenidos de adición.

Figura 44

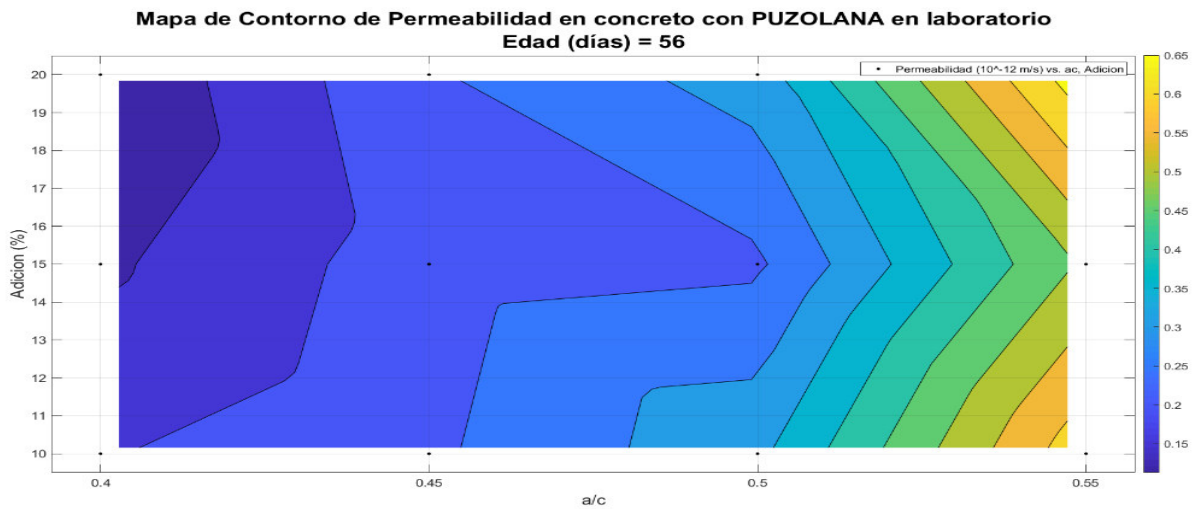
Mapa de contorno de permeabilidad con Puzolana Mediante MLR-56 días



Nota: elaboración propia.

Figura 45

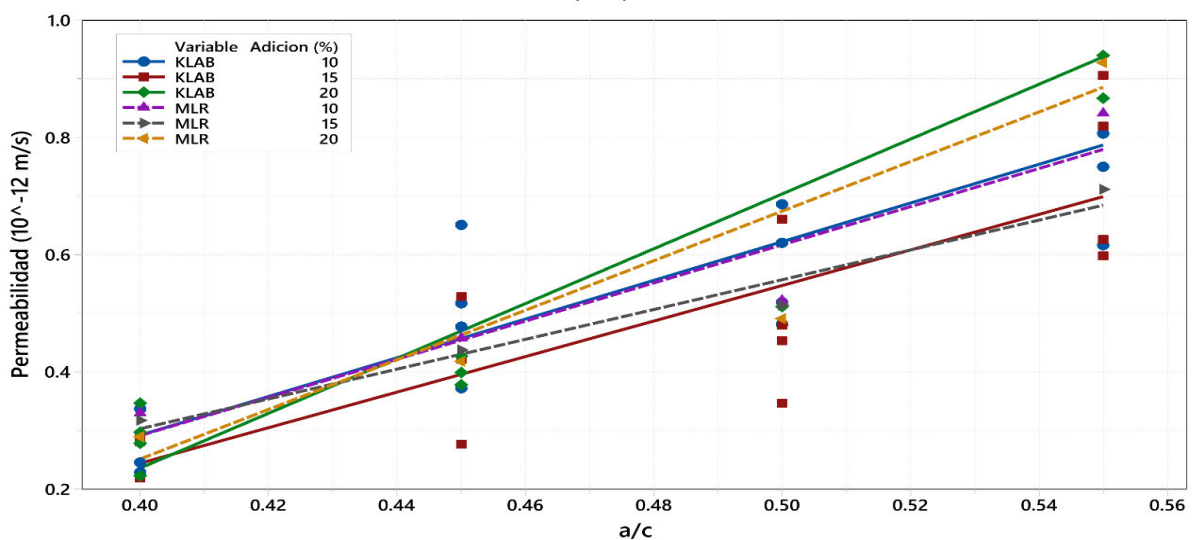
Mapa de contorno de permeabilidad en laboratorio con Puzolana-56 días



Se realizaron estas graficas determinando los valores de permeabilidad del concreto mediante las ecuaciones de regresión multiple lineal y los determinados en laboratorio para edades de 56 días en muestras con puzolana, para los diferentes contenidos de a/c.

Figura 46

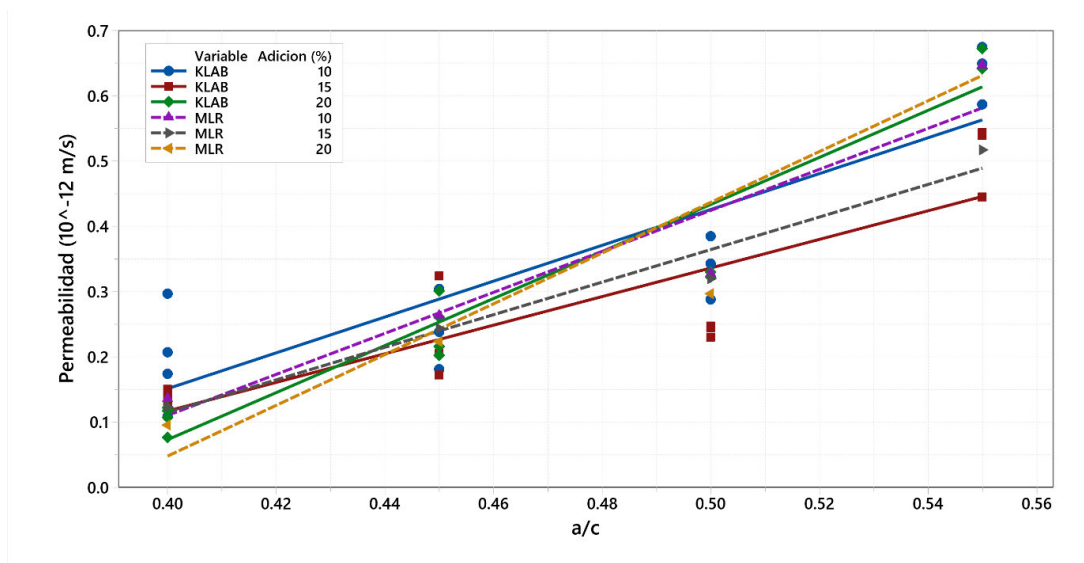
Graficas comparativas de Permeabilidad concreto con puzolana mediante MLR y experimental-28 días



Nota: elaboración propia.

Figura 47

Graficas comparativas de Permeabilidad concreto con puzolana mediante MLR y experimental-56 días



Nota: elaboración propia.

En forma gráfica se puede observar la aproximación de los valores de permeabilidad calculados en forma experimental y en laboratorio; las mejores aproximaciones se observan a los 56 días; los menores valores de permeabilidad fueron para 0.40 y 15 % a la edad de 56 días; asimismo para 15 % de adición de puzolana, ambas graficas son muy aproximadas, y con valores muy bajos de permeabilidad

Contrastación de hipótesis

Análisis estadístico de los valores obtenidos de coeficiente de permeabilidad

e) Del total de muestras de concreto adicionados, se tiene el siguiente conteo:

- 116 muestras contienen adiciones de Metacaolín (ME)
- 158 muestras contienen adición de microsíllice (MI)
- 96 muestras contienen adición de puzolana (PU)
- 138 corresponden a muestras sin adiciones (SA).

Tabla 95*Datos estadísticos de las permeabilidades en las 506 muestras*

Estadísticas del coeficiente de permeabilidad*10⁻¹³						
Muestra	N°	Min	Max	Media	Moda	Std
Metacaolín (ME)	116	0.12	37.8	8.9857	2.14	12.279
Microsílice (MI)	158	0.2	10	3.223	0.15	2.0663
Puzolana (PU)	96	0.8	12	4.4239	2.05	2.6026
Sin Adición (SA)	138	2.33	73.3	36.37	17.8	131.638

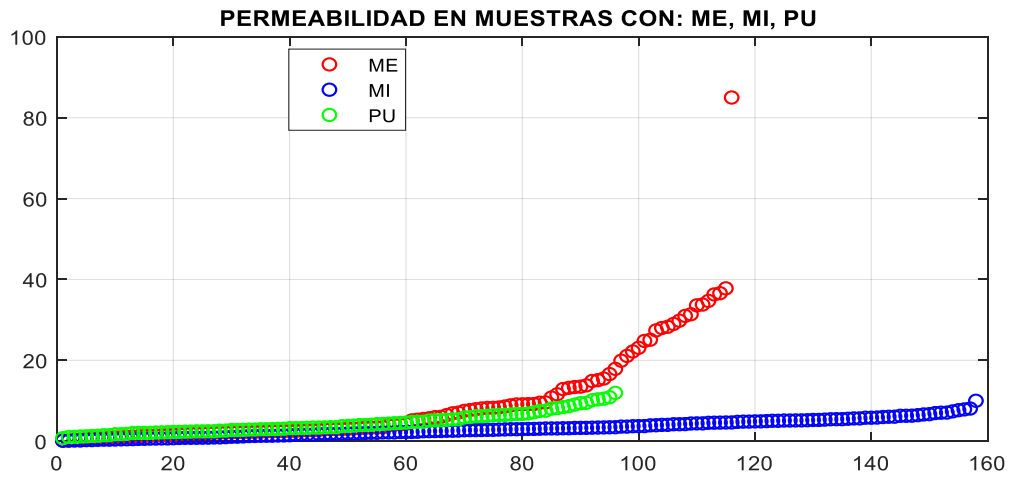
Nota: elaboración propia.

A) Con la tabla de las estadísticas, se establece que en todos los casos las adiciones reducen considerablemente la permeabilidad del concreto en comparación con el concreto sin adición.

El rango de la permeabilidad para las muestras sin adición es de [2.33, 73.3] x10⁻¹³ m/s con media 36.37x10⁻¹³ m/s. Mientras que en los concretos con adición de Metacaolín el rango máximo es [0.12, 37.80] x10⁻¹³ m/s, con media 8.98x10⁻¹³ m/s; para el caso de puzolanas están desde [0.8 ,12]x10⁻¹³ m/s; y con mayor notoriedad se encuentra los valores de permeabilidad con Microsílice [0.2 ,10]x10⁻¹³m/s.

f) Se presentan tres Graficas ilustrativas de las permeabilidades obtenidas en las muestras con adiciones de Metacaolín (ME), Microsílice (MI), Puzolana (PU)

Figura 48*Valores de permeabilidad de las muestras con adición, elaboración propia.*

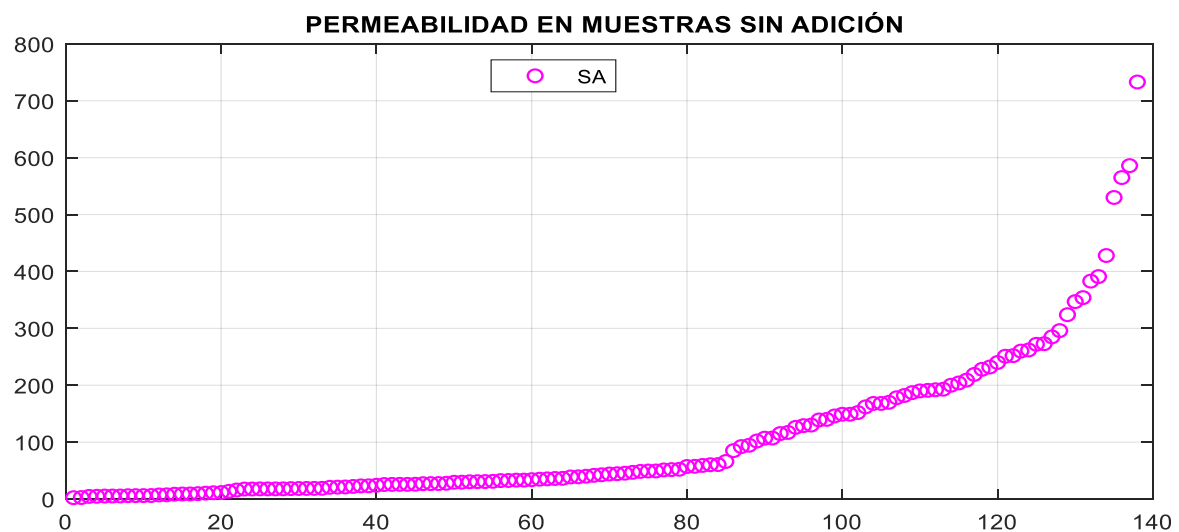


Nota: elaboración propia.

- g) El aumento de los valores de la permeabilidad, para las muestras con adición de Microsílice (MI) es la más lenta y tiene niveles más bajos de permeabilidad, su máximo valor es 10×10^{-13} m/s. Le siguen las muestras con puzolana (PU), que tiene un comportamiento similar, con máximo 11.96×10^{-13} m/s. En las muestras con Metacaolín el crecimiento es similar en las 80 primeras muestras, pero para el resto el crecimiento es rápido y sube hasta 37×10^{-13} m/s.

Figura 49

Valores de permeabilidad de las muestras de control sin adición



Nota: elaboración propia.

Asimismo, podemos observar como el aumento de los valores de la permeabilidad, para las muestras sin adición es lenta y aceptable para las 11 primeras muestras, luego va creciendo hasta las 64 primeras muestras, alcanzando un máximo de 36.4×10^{-13} m/s. Luego el crecimiento es acelerado llegando hasta 733×10^{-13} m/s. En consecuencia, apenas el 7.9% del total de muestras sin adición tienen una permeabilidad aceptable y el 92.1% tiene permeabilidad alta, en comparación con las muestras que tienen adiciones minerales.

Prueba de Hipótesis con ANOVA

ANOVA para Permeabilidad con metacaolín

Las hipótesis de contraste son:

1) H0: Los promedios de las permeabilidades para la adición=metacaolín=1, a los 28 y 56 días son estadísticamente iguales.

2) H1: Los promedios de las permeabilidades para la adición=1, a los 28 y 56 días no son estadísticamente iguales

En la tabla 96, se muestra que la probabilidad es igual a $0.0868 \neq 0.05$, por lo que la hipótesis H0 no se cumple; en consecuencia, la hipótesis 1 prevalece y la permeabilidad cambia, siendo a los 56 días más baja que a los 28 días.

La permeabilidad promedio a los 28 días es de 11.9×10^{-13} m/s.

Tabla 96

ANOVA para los concretos con adición de metacaolín

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados ($\times 10^{-22}$ m ² /s)	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados ($\times 10^{-24}$ m ² /s)	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.05	1.00	4.60	2.99	0.0868	3.93
Dentro de grupos	1.60	103.00	1.50			

Total	1.60	104.00
-------	------	--------

Nota: elaboración propia.

0.0868 \nless 0.05, demuestra que la permeabilidad sigue cambiando después de 28 días

ANOVA para permeabilidad con microsíllice

Las hipótesis de contraste son:

1) H0: Los promedios de las permeabilidades para la adición=2=microsíllice, a los 28, 56 y 100 días son estadísticamente iguales. De aquí se concluye que la permeabilidad ya no cambia después de los 28 días.

2) H1: Los promedios de las permeabilidades para la adición=2, a los 28, 56 y 100 días no son estadísticamente iguales.

En la tabla 97 se muestra que la probabilidad es igual a 0.00013 < 0.05, por lo que la hipótesis H0 se cumple; es decir estadísticamente después de los 28 días la permeabilidad del concreto con microsíllice se estandariza, siendo la permeabilidad promedio a los 28 días es de 3.93×10^{-13} m/s.

Tabla 97

ANOVA para los concretos con adición de microsíllice

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados (x10-24 m2/s)	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados (x10-25 m2/s)	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.72	2.00	3.60	9.52	0.00013	3.06
Dentro-grupos	5.30	139.00	0.38			
Total	6.00	141.00				

Nota: elaboración propia.

ANOVA para la permeabilidad con puzolana

Las hipótesis de contraste son:

1) H0: Los promedios de las permeabilidades para la adición=3= puzolana, a los 28 y 56 días son estadísticamente iguales. De aquí se concluye que la permeabilidad ya no cambia después de los 28 días.

2) H1: Los promedios de las permeabilidades para la adición=3, a los 28 y 56 días no son estadísticamente iguales; en consecuencia, la permeabilidad cambia, siendo a los 56 días más baja que a los 28 días.

Tabla 98

ANOVA para los concretos con adición de microsílíce

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados ($\times 10^{-24}$ m²/s)	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados ($\times 10^{-24}$ m²/s)	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	1.20	1.00	1.20	20.76	0.000017	3.96
Dentro-grupos	4.80	84.00	0.06			
Total	6.00	85.00				

Nota: elaboración propia.

En la tabla 98 se muestra que la probabilidad es igual a $0.000017 < 0.05$, por lo que la hipótesis H0 se cumple, es decir después de los 28 días la permeabilidad no cambia siendo que la permeabilidad promedio a los 28 días es de 5.62×10^{-13} m/s.

– Análisis de validación de las hipótesis- Prueba T-Student

a. Primero se realizó la prueba F-Snedecor en aras de verificar si las varianzas de los valores de coeficiente de permeabilidad obtenidos en dos diseños de concreto (concreto sin adición y concreto con adición), son iguales o diferentes.

h) H0: $\sigma_1 - \sigma_2 = 0$; por tanto, las varianzas de la muestra de concretos sin adición y la muestra de concretos adicionados son iguales.

i) $H_1: \sigma_1 - \sigma_2 \neq 0$; por tanto, las varianzas de la muestra de concretos sin adición y la muestra de concretos adicionados son diferentes.

b. Luego se realizó la prueba de t – Student para dos muestras, en aras de verificar si las medias de los valores de coeficiente de permeabilidad obtenidos en dos diseños de concreto (concreto sin adición y concreto con adición), son iguales o diferentes.

j) $H_0: X_1 - X_2 = 0$; por tanto, las medias de la muestra de concretos sin adición y la muestra de concretos adicionados son iguales.

k) $H_1: X_1 - X_2 \neq 0$; por tanto, las medias de la muestra de concretos sin adición y la muestra de concretos adicionados son diferentes.

c. En ambas pruebas de hipótesis se consideró un nivel de significancia de 5%.

3.6.1.1. Validación de Hipótesis de permeabilidad del concreto con Microsílice

A. Diseño de concreto con relación $a/c=0,40$ (sin adición y con 5% de microsíllice)

Figura 50

Prueba F-Snedecor, para el concreto con relación $a/c=0,40$ sin adición y con adición 5% de Microsílice

Prueba F para varianzas de dos muestras

	0.40 - sin adición	0.40 - 5%MS
Media	2.50167E-12	3.11167E-13
Varianza	1.55617E-25	2.88937E-27
Observaciones	6	6
Grados de libertad	5	5
F	53.85840034	
P(F<=f) una cola	0.000238977	
Valor crítico para F (una cola)	5.050329058	

Prueba de Hipótesis: Se rechaza la hipótesis H_0 , por tanto las varianzas son diferentes

Nota: elaboración propia.

Figura 51

Resultado de la prueba t-student, para diseño de concreto con relación a/c=0,40 y con adición 5% de Microsílice, elaboración propia.

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales

	0.40 - sin adición	0.40 - 5%MS
Media	2.50167E-12	3.11167E-13
Varianza	1.55617E-25	2.88937E-27
Observaciones	6	6
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	5	
Estadístico t	13.47708551	
P(T<=t) una cola	2.01377E-05	
Valor crítico de t (una cola)	2.015048373	
P(T<=t) dos colas	4.02755E-05	
Valor crítico de t (dos colas)	2.570581836	

Prueba de Hipótesis:

Se rechaza la hipótesis H0, por tanto las medias son diferentes

Nota: elaboración propia.

Del resultado de la prueba de t – Student, se puede concluir que en los diseños de concreto con relación a/c=0.40, la adición de 5% de Microsílice reduce el coeficiente de permeabilidad del concreto, en comparación a los concretos sin adición; de 2.5×10^{-12} hasta 3.11×10^{-13} .

B. Diseño de concreto con relación a/c=0,45 (sin adición y con 5% de Microsílice)

Figura 52

Resultado de la prueba F-Snedecor para diseño de concreto con relación a/c=0,45 sin adición y con adición 5% de Microsílice

Prueba F para varianzas de dos muestras

	0.45 - sin adición	0.45 - 5%MS
Media	4.996E-12	4.365E-13
Varianza	8.8093E-25	8.8295E-27
Observaciones	5	6
Grados de libertad	4	5
F	99.77122147	
P(F<=f) una cola	5.90821E-05	
Valor crítico para F (una cola)	5.192167773	

Prueba de Hipótesis:

Se rechaza la hipótesis H0, por tanto las varianzas son diferentes

Nota: elaboración propia.

Figura 53

Resultado de la prueba t-Student para diseño de concreto con relación a/c=0,45 sin adición y con 5% de Microsílice

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales

	0.45 - sin adición	0.45 - 5%MS
Media	4.996E-12	4.365E-13
Varianza	8.8093E-25	8.8295E-27
Observaciones	5	6
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	4	
Estadístico t	10.81746117	
P(T<=t) una cola	0.000207145	
Valor crítico de t (una cola)	2.131846786	
P(T<=t) dos colas	0.000414289	
Valor crítico de t (dos colas)	2.776445105	

Prueba de Hipótesis: **Se rechaza la hipótesis H0, por tanto las medias son diferentes**

Nota: elaboración propia.

- 1) Del resultado de la prueba de t – Student, se puede concluir que en los diseños de concreto con relación a/c=0.45, la adición de 5% de Microsílice reduce el coeficiente de permeabilidad del concreto, en comparación a los concretos sin adición.

C. Diseño de concreto con relación a/c=0,50 (sin adición y con 5% de Microsílice)

Figura 54

Resultado de la prueba F-Snedecor, para diseño de concreto con relación a/c=0,50 sin adición y con 5% de Microsílice

Prueba F para varianzas de dos muestras

	0.50 - sin adición	0.50 - 5%MS
Media	1.09217E-11	5.55333E-13
Varianza	3.24634E-24	1.02767E-26
Observaciones	6	6
Grados de libertad	5	5
F	315.8939345	
P(F<=f) una cola	3.02862E-06	
Valor crítico para F (una cola)	5.050329058	

Prueba de Hipótesis: **Se rechaza la hipótesis H0, por tanto las varianzas son diferentes**

Nota: elaboración propia.

Figura 55

Resultado de la prueba t-student para diseño de concreto con relación a/c=0,50 sin adición y con 5% de Microsílice

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales

	0.50 - sin adición	0.50 - 5%MS
Media	1.09217E-11	5.55333E-13
Varianza	3.24634E-24	1.02767E-26
Observaciones	6	6
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	5	
Estadístico t	14.07076457	
P(T<=t) una cola	1.63104E-05	
Valor crítico de t (una cola)	2.015048373	
P(T<=t) dos colas	3.26209E-05	
Valor crítico de t (dos colas)	2.570581836	

Prueba de Hipótesis: Se rechaza la hipótesis H0, por tanto las medias son diferentes

Nota: elaboración propia.

Del resultado de la prueba de t – Student, se puede concluir que en los diseños de concreto con relación a/c=0.50, la adición de 5% de Microsílice reduce el coeficiente de permeabilidad del concreto, en comparación a los concretos sin adición.

D. Diseño de concreto con relación a/c=0,55(sin adición y con 5% de Microsílice)

Figura 56

Resultado de la prueba F-Snedecor, a/c=0,55 sin adición y con adición 5% de Microsílice

Prueba F para varianzas de dos muestras

	0.55 - sin adición	0.55 - 5%MS
Media	2.06833E-11	6.27833E-13
Varianza	3.40417E-23	3.84897E-27
Observaciones	6	6
Grados de libertad	5	5
F	8844.365154	
P(F<=f) una cola	7.38171E-10	
Valor crítico para F (una cola)	5.050329058	

Prueba de Hipótesis: Se rechaza la hipótesis H0, por tanto las varianzas son diferentes

Nota: elaboración propia.

Se demuestra la influencia de la microsíllice en la permeabilidad

Figura 57

Resultado de la prueba t-student para diseño de concreto con relación a/c=0,55 con adición y con adición 5% de Microsíllice

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales

	0.55 - sin adición	0.55 - 5%MS
Media	2.06833E-11	6.27833E-13
Varianza	3.40417E-23	3.84897E-27
Observaciones	6	6
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	5	
Estadístico t	8.419361573	
P(T<=t) una cola	0.000193811	
Valor crítico de t (una cola)	2.015048373	
P(T<=t) dos colas	0.000387621	
Valor crítico de t (dos colas)	2.570581836	

Prueba de Hipótesis:

Se rechaza la hipótesis H0, por tanto las medias son diferentes

Nota: elaboración propia

Del resultado de la prueba de t – Student, se puede concluir que en los diseños de concreto con relación a/c=0.55, la adición de 5% de Microsíllice reduce el coeficiente de permeabilidad del concreto, en comparación a los concretos sin adición.

E. Diseño de concreto con relación a/c=0,45 (sin adición y con 10% de Microsíllice)

Figura 58

Resultado de la prueba F-Snedecor para diseño de concreto con relación a/c=0,45 sin adición y con adición 10% de Microsíllice

Prueba F para varianzas de dos muestras

	0.45 - sin adición	0.45 - 10%MS
Media	4.996E-12	1.616E-13
Varianza	8.8093E-25	2.39368E-27
Observaciones	5	6
Grados de libertad	4	5
F	368.0232947	
P(F<=f) una cola	2.32767E-06	
Valor crítico para F (una cola)	5.192167773	

Prueba de Hipótesis:

Se rechaza la hipótesis H0, por tanto las varianzas son diferentes

Nota: elaboración propia.

Figura 59

Resultado de la prueba t-student para diseño de concreto con relación a/c=0,45 con adición y con adición 10% de Microsílice

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales

	0.45 - sin adición	0.45 - 10%MS
Media	4.996E-12	1.616E-13
Varianza	8.8093E-25	2.39368E-27
Observaciones	5	6
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	4	
Estadístico t	11.50444685	
P(T<=t) una cola	0.000162965	
Valor crítico de t (una cola)	2.131846786	
P(T<=t) dos colas	0.000325929	
Valor crítico de t (dos colas)	2.776445105	

Prueba de Hipótesis:

Se rechaza la hipótesis H0, por tanto las medias son diferentes

Nota: elaboración propia.

Del resultado de la prueba de t – Student, se puede concluir que en los diseños de concreto con relación a/c=0.45, la adición de 10% de Microsílice reduce el coeficiente de permeabilidad del concreto, en comparación a los concretos sin adición.

F. Diseño de concreto con relación a/c=0,40 (sin adición y con 10% de Microsílice)

Figura 60

Resultado de la prueba F-Snedecor para concreto con relación a/c=0,4 sin adición y con adición 10% de Microsílice

Prueba F para varianzas de dos muestras

	0.40 - sin adición	0.40 - 10%MS
Media	2.50167E-12	1.12483E-13
Varianza	1.55617E-25	2.86897E-27
Observaciones	6	6
Grados de libertad	5	5
F	54.24130777	
P(F<=f) una cola	0.000234889	
Valor crítico para F (una cola)	5.050329058	

Prueba de Hipótesis: Se rechaza la hipótesis H0, por tanto las varianzas son diferentes

Nota: elaboración propia.

Figura 61

Resultado de la prueba t-Student para diseño de concreto con relación a/c=0,40 sin adición y con adición 10% de Microsílice

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales

	0.40 - sin adición	0.40 - 10%MS
Media	2.50167E-12	1.12483E-13
Varianza	1.55617E-25	2.86897E-27
Observaciones	6	6
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	5	
Estadístico t	14.7004337	
P(T<=t) una cola	1.31622E-05	
Valor crítico de t (una cola)	2.015048373	
P(T<=t) dos colas	2.63244E-05	
Valor crítico de t (dos colas)	2.570581836	

Prueba de Hipótesis: Se rechaza la hipótesis H0, por tanto las medias son diferentes

Nota: elaboración propia.

Del resultado de la prueba de t – Student, se puede concluir que en los diseños de concreto con relación a/c=0.40, la adición de 10% de Microsílice reduce el coeficiente de permeabilidad del concreto, en comparación a los concretos sin adición.

G. Diseño de concreto con relación a/c=0,50 (sin adición y con 10% de Microsílice)

Figura 62

Resultado de la prueba F-Snedecor para $a/c=0,50$ sin adición y con adición 10% de MS

Prueba F para varianzas de dos muestras

	0.50 - sin adición	0.50 - 10%MS
Media	1.09217E-11	2.25167E-13
Varianza	3.24634E-24	6.28967E-28
Observaciones	6	6
Grados de libertad	5	5
F	5161.381101	
P(F<=f) una cola	2.8365E-09	
Valor crítico para F (una cola)	5.050329058	

Prueba de Hipótesis: **Se rechaza la hipótesis H0, por tanto las varianzas son diferentes**

Nota: elaboración propia.

Figura 63

Resultado de la prueba t-student para diseño de concreto con relación $a/c=0,50$ sin adición y con 10% de Microsílice

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales

	0.50 - sin adición	0.50 - 10%MS
Media	1.09217E-11	2.25167E-13
Varianza	3.24634E-24	6.28967E-28
Observaciones	6	6
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	5	
Estadístico t	14.540471	
P(T<=t) una cola	1.38874E-05	
Valor crítico de t (una cola)	2.015048373	
P(T<=t) dos colas	2.77748E-05	
Valor crítico de t (dos colas)	2.570581836	

Prueba de Hipótesis: **Se rechaza la hipótesis H0, por tanto las medias son diferentes**

Nota: elaboración propia.

Del resultado de la prueba de t – Student, se puede concluir que los diseños $a/c=0.50$, y 10% de MS reduce la permeabilidad del concreto, respecto a los concretos sin adición.

H. Diseño de concreto con relación $a/c=0,55$ (sin adición y con 10% de Microsílice)

Figura 64

Resultado de la prueba F-Snedecor para diseño de concreto con relación a/c=0,55 sin adición y con adición 10% de Microsílice, elaboración propia.

Prueba F para varianzas de dos muestras

	0.55 - sin adición	0.55 - 10%MS
Media	2.06833E-11	3.67333E-13
Varianza	3.40417E-23	1.30483E-26
Observaciones	6	6
Grados de libertad	5	5
F	2608.903354	
P(F<=f) una cola	1.56048E-08	
Valor crítico para F (una cola)	5.050329058	

Prueba de Hipótesis: Se rechaza la hipótesis H0, por tanto las varianzas son diferentes

Nota: elaboración propia.

Figura 65

Resultado de la prueba t-student para diseño de concreto con relación a/c=0,55 sin adición y con adición 10% de Microsílice

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales

	0.55 - sin adición	0.55 - 10%MS
Media	2.06833E-11	3.67333E-13
Varianza	3.40417E-23	1.30483E-26
Observaciones	6	6
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	5	
Estadístico t	8.527568265	
P(T<=t) una cola	0.000182473	
Valor crítico de t (una cola)	2.015048373	
P(T<=t) dos colas	0.000364946	
Valor crítico de t (dos colas)	2.570581836	

Prueba de Hipótesis: Se rechaza la hipótesis H0, por tanto las medias son diferentes

Nota: elaboración propia.

Del resultado de la prueba de t – Student, se puede concluir que en los diseños de concreto con relación a/c=0.55, la adición de 10% de Microsílice reduce el coeficiente de permeabilidad del concreto, en comparación a los concretos sin adición.

3.6.1.2. Metacaolín

A. Diseño de concreto con relación a/c=0,40 (sin adición y con 10% de Metacaolín)

Figura 66

Resultado de la prueba F-Snedecor para diseño de concreto con relación a/c=0,40 sin adición y con adición 10% de Microsílice

Prueba F para varianzas de dos muestras

	0.40 - sin adición	0.40 - 10%MK
Media	2.50167E-12	5.432E-13
Varianza	1.55617E-25	2.98157E-26
Observaciones	6	5
Grados de libertad	5	4
F	5.219286036	
P(F<=f) una cola	0.06726985	
Valor crítico para F (una cola)	6.256056502	

Prueba de Hipótesis: Se acepta la hipótesis H0, por tanto las varianzas son iguales

Nota: elaboración propia.

Figura 67

Resultado de la prueba t-student para diseño de concreto con relación a/c=0,40 sin adición y con adición 10% de Metacaolín

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales

	0.40 - sin adición	0.40 - 10%MK
Media	2.50167E-12	5.432E-13
Varianza	1.55617E-25	2.98157E-26
Observaciones	6	5
Varianza agrupada	9.97051E-26	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	9	
Estadístico t	10.24287153	
P(T<=t) una cola	1.46467E-06	
Valor crítico de t (una cola)	1.833112933	
P(T<=t) dos colas	2.92934E-06	
Valor crítico de t (dos colas)	2.262157163	

Prueba de Hipótesis: Se rechaza la hipótesis H0, por tanto las medias son diferentes

Nota: elaboración propia.

Del la prueba de t – Student, se puede concluir que en los diseños de concreto con a/c=0.40, la adición de 10% de Metacaolín reduce el coeficiente de permeabilidad del concreto, en comparación a los concretos sin adición.

B. Diseño de concreto con relación a/c=0,45 (sin adición y con 10% de Metacaolín)

Figura 68

Resultado de la prueba F-Snedecor para diseño de concreto con relación a/c=0,45 sin adición y con adición 10% de Metacaolín

Prueba F para varianzas de dos muestras

	0.45 - sin adición	0.45 - 10%MK
Media	4.996E-12	8.69E-13
Varianza	8.8093E-25	3.5465E-27
Observaciones	5	5
Grados de libertad	4	4
F	248.3941915	
P(F<=f) una cola	4.81045E-05	
Valor crítico para F (una cola)	6.388232909	

Prueba de Hipótesis: Se rechaza la hipótesis H0, por tanto las varianzas son diferentes

Nota: elaboración propia.

Figura 69

Resultado de la prueba t-student para diseño de concreto con relación a/c=0,45 sin adición y con adición 10% de Metacaolín

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales

	0.45 - sin adición	0.45 - 10%MK
Media	4.996E-12	8.69E-13
Varianza	8.8093E-25	3.5465E-27
Observaciones	5	5
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	4	
Estadístico t	9.812424357	
P(T<=t) una cola	0.000302363	
Valor crítico de t (una cola)	2.131846786	
P(T<=t) dos colas	0.000604726	
Valor crítico de t (dos colas)	2.776445105	

Prueba de Hipótesis: Se rechaza la hipótesis H0, por tanto las medias son diferentes

Nota: elaboración propia.

Del resultado de la prueba de t – Student, se puede concluir que en los diseños de concreto con relación a/c=0.45, la adición de 10% de Metacaolín reduce el coeficiente de permeabilidad del concreto, en comparación a los concretos sin adición.

C. Diseño de concreto con relación a/c=0,50 (sin adición y con 10% de Metacaolín)

Figura 70

Resultado de la prueba F-Snedecor, para diseño de concreto con relación a/c=0,50 sin adición y con adición 10% de Metacaolín

Prueba F para varianzas de dos muestras

	0.50 - sin adición	0.50 - 10%MK
Media	1.09217E-11	1.2655E-12
Varianza	3.24634E-24	2.10828E-25
Observaciones	6	4
Grados de libertad	5	3
F	15.39805813	
P(F<=f) una cola	0.023833871	
Valor crítico para F (una cola)	9.013455168	

Prueba de Hipótesis: Se rechaza la hipótesis H0, por tanto las varianzas son diferentes

Nota: elaboración propia.

Figura 71

Resultado de la prueba t-student concreto a/c=0,50 sin adición y con adición 10% de Metacaolín

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales

	0.50 - sin adición	0.50 - 10%MK
Media	1.09217E-11	1.2655E-12
Varianza	3.24634E-24	2.10828E-25
Observaciones	6	4
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	6	
Estadístico t	12.53135916	
P(T<=t) una cola	7.89802E-06	
Valor crítico de t (una cola)	1.943180281	
P(T<=t) dos colas	1.5796E-05	
Valor crítico de t (dos colas)	2.446911851	

Prueba de Hipótesis: Se rechaza la hipótesis H0, por tanto las medias son diferentes

Nota: elaboración propia.

Del resultado de la prueba de t – Student, se puede concluir que en los diseños a/c=0.50, con 10% de Metacaolín, reduce la permeabilidad del concreto, respecto al concreto sin adición.

D. Diseño de concreto con relación a/c=0,55 (sin adición y con 10% de Metacaolín)

Figura 72

Resultado de la prueba F-Snedecor para concreto con relación a/c=0,55 sin adición y con 10% de Metacaolín

Prueba F para varianzas de dos muestras

	0.55 - sin adición	0.55 - 10%MK
Media	2.06833E-11	2.886E-12
Varianza	3.40417E-23	3.9193E-25
Observaciones	6	5
Grados de libertad	5	4
F	86.85649648	
P(F<=f) una cola	0.00036109	
Valor crítico para F (una cola)	6.256056502	

Prueba de Hipótesis: Se rechaza la hipótesis H0, por tanto las varianzas son diferentes

Nota: elaboración propia.

Figura 73

Resultado de la prueba t-student para diseño de concreto con relación a/c=0,55 sin adición y con adición 10% de Metacaolín

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales

	0.55 - sin adición	0.55 - 10%MK
Media	2.06833E-11	2.886E-12
Varianza	3.40417E-23	3.9193E-25
Observaciones	6	5
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	5	
Estadístico t	7.420712481	
P(T<=t) una cola	0.000349987	
Valor crítico de t (una cola)	2.015048373	
P(T<=t) dos colas	0.000699975	
Valor crítico de t (dos colas)	2.570581836	

Prueba de Hipótesis: Se rechaza la hipótesis H0, por tanto las medias son diferentes

Nota: elaboración propia.

Del resultado de la prueba de t – Student, se puede concluir que en los diseños de concreto con relación a/c=0.55, la adición de 10% de Metacaolín reduce el coeficiente de permeabilidad del concreto, en comparación a los concretos sin adición.

E. Diseño de concreto con relación a/c=0,40 (sin adición y con 15% de Metacaolín)

Figura 74

Resultado de la prueba F-Snedecor para diseño de concreto con relación $a/c=0,40$ sin adición y con adición 15% de Metacaolín

Prueba F para varianzas de dos muestras

	0.40 - sin adición	0.40 - 15%MK
Media	2.50167E-12	1.2596E-13
Varianza	1.55617E-25	2.87991E-27
Observaciones	6	5
Grados de libertad	5	4
F	54.03529094	
P(F<=f) una cola	0.000917641	
Valor crítico para F (una cola)	6.256056502	

Prueba de Hipótesis: Se rechaza la hipótesis H0, por tanto las varianzas son diferentes

Nota: elaboración propia.

Figura 75

Resultado de la prueba t-student para diseño de concreto con relación $a/c=0,40$ sin adición y con adición 15% de Metacaolín

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales

	0.40 - sin adición	0.40 - 15%MK
Media	2.50167E-12	1.2596E-13
Varianza	1.55617E-25	2.87991E-27
Observaciones	6	5
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	5	
Estadístico t	14.59052139	
P(T<=t) una cola	1.36555E-05	
Valor crítico de t (una cola)	2.015048373	
P(T<=t) dos colas	2.73109E-05	
Valor crítico de t (dos colas)	2.570581836	

Prueba de Hipótesis: Se rechaza la hipótesis H0, por tanto las medias son diferentes

Nota: elaboración propia.

Del resultado de la prueba de t – Student, se puede concluir que en los diseños de concreto con relación $a/c=0.40$, la adición de 15% de Metacaolín reduce el coeficiente de permeabilidad del concreto, en comparación a los concretos sin adición.

F. Diseño de concreto con relación $a/c=0,45$ (sin adición y con 15% de Metacaolín)

Figura 76

Resultado de la prueba F-Snedecor para concreto con relación $a/c=0,45$ sin adición y con adición 15% de Metacaolín

Prueba F para varianzas de dos muestras

	0.45 - sin adición	0.45 - 15%MK
Media	4.996E-12	2.142E-13
Varianza	8.8093E-25	5.5047E-27
Observaciones	5	5
Grados de libertad	4	4
F	160.032336	
P(F<=f) una cola	0.000115211	
Valor critico para F (una cola)	6.388232909	

Prueba de Hipótesis: **Se rechaza la hipótesis H0, por tanto las varianzas son diferentes**

Nota: elaboración propia.

Figura 77

Resultado de la prueba t-student para diseño de concreto con relación $a/c=0,45$ con adición y con adición 15% de Metacaolín

Prueba F para varianzas de dos muestras

	0.45 - sin adición	0.45 - 15%MK
Media	4.996E-12	2.142E-13
Varianza	8.8093E-25	5.5047E-27
Observaciones	5	5
Grados de libertad	4	4
F	160.032336	
P(F<=f) una cola	0.000115211	
Valor critico para F (una cola)	6.388232909	

Prueba de Hipótesis: **Se rechaza la hipótesis H0, por tanto las varianzas son diferentes**

Nota: elaboración propia.

Del resultado de la prueba de t – Student, se puede concluir que en los diseños de concreto con relación $a/c=0.45$, la adición de 15% de Metacaolín reduce el coeficiente de permeabilidad del concreto, en comparación a los concretos sin adición.

G. Diseño de concreto con relación $a/c=0,50$ (sin adición y con 15% de Metacaolín)

Figura 78

Resultado de la prueba F- Snedecor para de concreto con relación $a/c=0,50$ sin adición y con adición 15% de Metacaolín

Prueba F para varianzas de dos muestras

	0.50 - sin adición	0.50 - 15%MK
Media	1.09217E-11	2.224E-13
Varianza	3.24634E-24	6.0043E-27
Observaciones	6	5
Grados de libertad	5	4
F	540.6686319	
P(F<=f) una cola	9.53607E-06	
Valor crítico para F (una cola)	6.256056502	

Prueba de Hipótesis: Se rechaza la hipótesis H0, por tanto las varianzas son diferentes

Nota: elaboración propia.

Figura 79

Resultado de la prueba t-student para diseño de concreto con relación $a/c=0,50$ sin adición y con adición 15% de Metacaolín

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales

	0.50 - sin adición	0.50 - 15%MK
Media	1.09217E-11	2.224E-13
Varianza	3.24634E-24	6.0043E-27
Observaciones	6	5
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	5	
Estadístico t	14.52952578	
P(T<=t) una cola	1.39388E-05	
Valor crítico de t (una cola)	2.015048373	
P(T<=t) dos colas	2.78775E-05	
Valor crítico de t (dos colas)	2.570581836	

Prueba de Hipótesis: **Se rechaza la hipótesis H0, por tanto las medias son diferentes**

Nota: elaboración propia.

Del resultado de la prueba de t – Student, se puede concluir que los diseños de $a/c=0.50$, 15% de Metacaolín reduce la permeabilidad del concreto, respecto al concreto sin adición.

H. Diseño de concreto con relación $a/c=0,55$ (sin adición y con 15% de Metacaolín)

Figura 80

Resultado de la prueba F- Snedecor, para diseño de concreto con relación $a/c=0,55$ sin adición y con adición 15% de Metacaolín

Prueba F para varianzas de dos muestras

	0.55 - sin adición	0.55 - 15%MK
Media	2.06833E-11	2.632E-13
Varianza	3.40417E-23	2.8432E-27
Observaciones	6	5
Grados de libertad	5	4
F	11973.01163	
P(F<=f) una cola	1.95283E-08	
Valor crítico para F (una cola)	6.256056502	

Prueba de Hipótesis: **Se rechaza la hipótesis H0, por tanto las varianzas son diferentes**

Nota: elaboración propia.

Figura 81

Resultado de la prueba t-student para diseño de concreto con relación a/c=0,55 sin adición y con 15% de Metacaolín

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales

	0.55 - sin adición	0.55 - 15%MK
Media	2.06833E-11	2.632E-13
Varianza	3.40417E-23	2.8432E-27
Observaciones	6	5
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	5	
Estadístico t	8.572490819	
P(T<=t) una cola	0.000177999	
Valor crítico de t (una cola)	2.015048373	
P(T<=t) dos colas	0.000355997	
Valor crítico de t (dos colas)	2.570581836	

Prueba de Hipótesis:

Se rechaza la hipótesis H0, por tanto las medias son diferentes

Nota: elaboración propia.

De la prueba de t – Student, se puede concluir que en los diseños de relación a/c=0.55, 15% de Metacaolín reduce la permeabilidad del concreto, respecto al concreto sin adición.

3.6.1.3. *Puzolana*

A. Diseño de concreto con relación a/c=0,40 (sin adición y con 10% de Puzolana)

Figura 82

Resultado de la prueba F-Snedecor para diseño de concreto con relación a/c=0,40 sin adición y con adición 10% de puzolana

Prueba F para varianzas de dos muestras

	0.40 - sin adición	0.40 - 10%PU
Media	2.37E-12	2.36667E-13
Varianza	1.68575E-25	7.43333E-29
Observaciones	9	3
Grados de libertad	8	2
F	2267.825112	
P(F<=f) una cola	0.00044083	
Valor crítico para F (una cola)	19.3709929	

Prueba de Hipótesis:

Se rechaza la hipótesis H0, por tanto las varianzas son diferentes

Nota: elaboración propia. .

Figura 83

Resultado de la prueba t-student para a/c=0,40 sin adición y con adición 10% de puzolana

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales

	0.40 - sin adición	0.40 - 10%PU
Media	2.37E-12	2.36667E-13
Varianza	1.68575E-25	7.43333E-29
Observaciones	9	3
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	8	
Estadístico t	15.57744856	
P(T<=t) una cola	1.43711E-07	
Valor crítico de t (una cola)	1.859548038	
P(T<=t) dos colas	2.87422E-07	
Valor crítico de t (dos colas)	2.306004135	

Prueba de Hipótesis:

Se rechaza la hipótesis H0, por tanto las medias son diferentes

Nota: elaboración propia.

Del resultado de la prueba de t – Student, se puede concluir que en los diseños de concreto con relación a/c=0,40 la adición de 10% de puzolana reduce el coeficiente de permeabilidad del concreto, en comparación a los concretos sin adición.

B. Diseño de concreto con relación a/c=0,45 (sin adición y con 10% de Puzolana)

Figura 84

Resultado de la prueba F-Snedecor para concreto con relación a/c=0,45 sin adición y con adición 10% de puzolana

Prueba F para varianzas de dos muestras

	0.45 - sin adición	0.45 - 10%PU
Media	4.88E-12	5.0425E-13
Varianza	6.62457E-25	1.33103E-26
Observaciones	8	4
Grados de libertad	7	3
F	49.77045081	
P(F<=f) una cola	0.004230765	
Valor crítico para F (una cola)	8.886742956	

Prueba de Hipótesis:

Se rechaza la hipótesis H0, por tanto las varianzas son diferentes

Nota: elaboración propia.

Figura 85

Resultado de la prueba t-student para diseño de concreto con relación a/c=0,45 sin adición y con adición 10% de puzolana

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales

	0.45 - sin adición	0.45 - 10%PU
Media	4.88E-12	5.0425E-13
Varianza	6.62457E-25	1.33103E-26
Observaciones	8	4
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	8	
Estadístico t	14.90951153	
P(T<=t) una cola	2.01923E-07	
Valor crítico de t (una cola)	1.859548038	
P(T<=t) dos colas	4.03847E-07	
Valor crítico de t (dos colas)	2.306004135	

Prueba de Hipótesis:

Se rechaza la hipótesis H0, por tanto las medias son diferentes

Nota: elaboración propia.

Del resultado de la prueba de t – Student, se puede concluir que en los diseños de concreto con relación a/c=0.45, la adición de 10% de puzolana reduce el coeficiente de permeabilidad del concreto, en comparación a los concretos sin adición.

C. Diseño de concreto con relación a/c=0,50 (sin adición y con 10% de Puzolana)

Figura 86

Resultado de la prueba F-Snedecor para concreto con relación a/c=0,50 sin adición y con adición 10% de puzolana

Prueba F para varianzas de dos muestras

	0.50 - sin adición	0.50 - 10%PU
Media	1.09922E-11	5.765E-13
Varianza	2.15599E-24	8.76967E-27
Observaciones	9	4
Grados de libertad	8	3
F	245.8467951	
P(F<=f) una cola	0.000388987	
Valor crítico para F (una cola)	8.84523846	

Prueba de Hipótesis:

Se rechaza la hipótesis H0, por tanto las varianzas son diferentes

Nota: elaboración propia.

Figura 87

Resultado de la prueba t-student para diseño de concreto con relación a/c=0,50 sin adición y con adición 10% de puzolana

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales

	0.50 - sin adición	0.50 - 10%PU
Media	1.09922E-11	5.765E-13
Varianza	2.15599E-24	8.76967E-27
Observaciones	9	4
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	8	
Estadístico t	21.18402712	
P(T<=t) una cola	1.29566E-08	
Valor crítico de t (una cola)	1.859548038	
P(T<=t) dos colas	2.59131E-08	
Valor crítico de t (dos colas)	2.306004135	

Prueba de Hipótesis: Se rechaza la hipótesis H0, por tanto las medias son diferentes

Nota: elaboración propia.

Del resultado de la prueba de t – Student, se puede concluir que en los diseños de concreto con relación a/c=0.50, la adición de 10% de puzolana reduce el coeficiente de permeabilidad del concreto, en comparación a los concretos sin adición.

D. Diseño de concreto con relación a/c=0,55 (sin adición y con 10% de Puzolana)

Figura 88

Resultado de la prueba F-Snedecor para diseño de concreto con relación a/c=0,55 sin adición y con adición 10% de puzolana

Prueba F para varianzas de dos muestras

	0.55 - sin adición	0.55 - 10%PU
Media	1.92333E-11	8.0075E-13
Varianza	2.80975E-23	2.97676E-26
Observaciones	9	4
Grados de libertad	8	3
F	943.8959047	
P(F<=f) una cola	5.18992E-05	
Valor crítico para F (una cola)	8.84523846	

Prueba de Hipótesis: **Se rechaza la hipótesis H0, por tanto las varianzas son diferentes**

Nota: elaboración propia.

Figura 89

Resultado de la prueba t-student para a/c=0,55 sin adición y con adición 10% de puzolana

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales

	0.55 - sin adición	0.55 - 10%PU
Media	1.92333E-11	8.0075E-13
Varianza	2.80975E-23	2.97676E-26
Observaciones	9	4
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	8	
Estadístico t	10.41973358	
P(T<=t) una cola	3.1197E-06	
Valor crítico de t (una cola)	1.859548038	
P(T<=t) dos colas	6.2394E-06	
Valor crítico de t (dos colas)	2.306004135	

Prueba de Hipótesis: **Se rechaza la hipótesis H0, por tanto las medias son diferentes**

Nota: elaboración propia.

Del resultado de la prueba de t – Student, se puede concluir que en los diseños de a/c=0.55, la adición de 10% de puzolana reduce la permeabilidad del concreto.

E. Diseño de concreto con relación a/c=0,40 (sin adición y con 15% de Puzolana)

Figura 90

Resultado de la prueba F- Snedecor para diseño de concreto con relación a/c=0,40 sin adición y con adición 15% de Puzolana

Prueba F para varianzas de dos muestras

	0.40 - sin adición	0.40 - 15%PU
Media	2.37E-12	2.9725E-13
Varianza	1.68575E-25	5.67092E-27
Observaciones	9	4
Grados de libertad	8	3
F	29.72623474	
P(F<=f) una cola	0.008922334	
Valor crítico para F (una cola)	8.84523846	

Prueba de Hipótesis: **Se rechaza la hipótesis H0, por tanto las varianzas son diferentes**

Nota: elaboración propia.

Figura 91

Resultado de la prueba t-student para diseño de concreto con relación a/c=0,40 con adición y con adición 15% de puzolana

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales

	0.40 - sin adición	0.40 - 15%PU
Media	2.37E-12	2.9725E-13
Varianza	1.68575E-25	5.67092E-27
Observaciones	9	4
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	9	
Estadístico t	14.6025225	
P(T<=t) una cola	7.12066E-08	
Valor crítico de t (una cola)	1.833112933	
P(T<=t) dos colas	1.42413E-07	
Valor crítico de t (dos colas)	2.262157163	

Prueba de Hipótesis: **Se rechaza la hipótesis H0, por tanto las medias son diferentes**

Nota: elaboración propia.

Del resultado de la prueba de t – Student, se puede concluir que en los diseños de concreto con relación a/c=0.40, la adición de 15% de puzolana reduce el coeficiente de permeabilidad del concreto, en comparación a los concretos sin adición.

F. Diseño de concreto con relación a/c=0,45 (sin adición y con 15% de Puzolana)

Figura 92

Resultado de la prueba F-Snedecor para concreto con relación a/c=0,45 con adición y con adición 15% de puzolana, elaboración propia

Prueba F para varianzas de dos muestras

	0.45 - sin adición	0.45 - 15%PU
Media	4.88E-12	4.2175E-13
Varianza	6.62457E-25	1.12809E-26
Observaciones	8	4
Grados de libertad	7	3
F	58.72369794	
P(F<=f) una cola	0.003313976	
Valor crítico para F (una cola)	8.886742956	

Prueba de Hipótesis: Se rechaza la hipótesis H0, por tanto las varianzas son diferentes

Nota: elaboración propia.

Figura 93

Resultado de la prueba t-student a/c=0,45 sin adición y con adición 15% de puzolana

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales

	0.45 - sin adición	0.45 - 15%PU
Media	4.88E-12	4.2175E-13
Varianza	6.62457E-25	1.12809E-26
Observaciones	8	4
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	7	
Estadístico t	15.23554908	
P(T<=t) una cola	6.31805E-07	
Valor crítico de t (una cola)	1.894578605	
P(T<=t) dos colas	1.26361E-06	
Valor crítico de t (dos colas)	2.364624252	

Prueba de Hipótesis: Se rechaza la hipótesis H0, por tanto las medias son diferentes

Nota: elaboración propia.

Del resultado de la prueba de t – Student, se puede concluir que en los diseños de concreto con relación a/c=0.45, la adición de 15% de puzolana reduce el coeficiente de permeabilidad del concreto, en comparación a los concretos sin adición.

G. Diseño de concreto con relación $a/c=0,50$ (sin adición y con 15% de Puzolana)

Figura 94

Resultado de la prueba F-Snedecor para diseño de concreto con relación $a/c=0,50$ sin adición y con adición 15% de puzolana, elaboración propia.

Prueba F para varianzas de dos muestras

	0.50 - sin adición	0.50 - 15%PU
Media	1.09922E-11	4.8525E-13
Varianza	2.15599E-24	1.70229E-26
Observaciones	9	4
Grados de libertad	8	3
F	126.6524701	
P(F<=f) una cola	0.001047034	
Valor crítico para F (una cola)	8.84523846	

Prueba de Hipótesis: Se rechaza la hipótesis H0, por tanto las varianzas son diferentes

Figura 95

Resultado de la prueba t-Student para diseño de concreto con relación $a/c=0,50$ sin adición y con adición 15% de puzolana

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales

	0.50 - sin adición	0.50 - 15%PU
Media	1.09922E-11	4.8525E-13
Varianza	2.15599E-24	1.70229E-26
Observaciones	9	4
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	8	
Estadístico t	21.27900087	
P(T<=t) una cola	1.25081E-08	
Valor crítico de t (una cola)	1.859548038	
P(T<=t) dos colas	2.50162E-08	
Valor crítico de t (dos colas)	2.306004135	

Prueba de Hipótesis: Se rechaza la hipótesis H0, por tanto las medias son diferentes

Nota: elaboración propia.

Del resultado de la prueba de t – Student, se puede concluir que en los diseños de concreto con relación $a/c=0.50$, la adición de 15% de puzolana reduce el coeficiente de permeabilidad del concreto, en comparación a los concretos sin adición.

H. Diseño de concreto con relación $a/c=0,55$ (sin adición y con 15% de Puzolana)

Figura 96

Resultado de la prueba F-Snedecor para concreto con relación $a/c=0,55$ sin adición y con adición 15% de puzolana

Prueba F para varianzas de dos muestras

	0.55 - sin adición	0.55 - 15%PU
Media	1.92333E-11	7.3725E-13
Varianza	2.80975E-23	2.23089E-26
Observaciones	9	4
Grados de libertad	8	3
F	1259.473977	
P(F<=f) una cola	3.36826E-05	
Valor crítico para F (una cola)	8.84523846	

Prueba de Hipótesis: Se rechaza la hipótesis H0, por tanto las varianzas son diferentes

Nota: elaboración propia.

Figura 97

Resultado de la prueba t-student para diseño de concreto con relación $a/c=0,55$ sin adición y con adición 15% de puzolana

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales

	0.55 - sin adición	0.55 - 15%PU
Media	1.92333E-11	7.3725E-13
Varianza	2.80975E-23	2.23089E-26
Observaciones	9	4
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	8	
Estadístico t	10.45874584	
P(T<=t) una cola	3.03339E-06	
Valor crítico de t (una cola)	1.859548038	
P(T<=t) dos colas	6.06679E-06	
Valor crítico de t (dos colas)	2.306004135	

Prueba de Hipótesis: Se rechaza la hipótesis H0, por tanto las medias son diferentes

Nota: elaboración propia.

Del resultado de la prueba de t – Student, se puede concluir que en los diseños de concreto con relación $a/c=0.55$, la adición de 15% de puzolana reduce el coeficiente de permeabilidad del concreto, en comparación a los concretos sin adición.

I. Diseño de concreto con relación $a/c=0,40$ (sin adición y con 20% de Puzolana)

Figura 98

Resultado de la prueba F-Snedecor para diseño de concreto con relación $a/c=0,40$ sin adición y con adición 20% de puzolana

Prueba F para varianzas de dos muestras

	0.40 - sin adición	0.40 - 20%PU
Media	2.37E-12	2.8625E-13
Varianza	1.68575E-25	2.62492E-27
Observaciones	9	4
Grados de libertad	8	3
F	64.22108638	
P(F<=f) una cola	0.002872525	
Valor crítico para F (una cola)	8.84523846	

Prueba de Hipótesis: Se rechaza la hipótesis H_0 , por tanto las varianzas son diferentes

Nota: elaboración propia.

Figura 99

Resultado de la prueba t-student para diseño de concreto con relación $a/c=0,40$ con adición y con adición 20% de puzolana

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales

	0.40 - sin adición	0.40 - 20%PU
Media	2.37E-12	2.8625E-13
Varianza	1.68575E-25	2.62492E-27
Observaciones	9	4
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	9	
Estadístico t	14.96555126	
P(T<=t) una cola	5.75427E-08	
Valor crítico de t (una cola)	1.833112933	
P(T<=t) dos colas	1.15085E-07	
Valor crítico de t (dos colas)	2.262157163	

Prueba de Hipótesis: Se rechaza la hipótesis H_0 , por tanto las medias son diferentes

Nota: elaboración propia.

Del resultado de la prueba de t – Student, se puede concluir que en los diseños de concreto con relación $a/c=0.40$, la adición de 20% de puzolana reduce el coeficiente de permeabilidad del concreto, en comparación a los concretos sin adición.

J. Diseño de concreto con relación $a/c=0,45$ (sin adición y con 20% de Puzolana)

Figura 100

Resultado de la prueba F-Snedecor para diseño de concreto con relación $a/c=0,45$ sin adición y con adición 20% de puzolana

Prueba F para varianzas de dos muestras

	0.45 - sin adición	0.45 - 20%PU
Media	4.88E-12	3.7825E-13
Varianza	6.62457E-25	2.53425E-27
Observaciones	8	4
Grados de libertad	7	3
F	261.4016545	
P(F<=f) una cola	0.00035887	
Valor crítico para F (una cola)	8.886742956	

Prueba de Hipótesis:

Se rechaza la hipótesis H_0 , por tanto las varianzas son diferentes

Nota: elaboración propia.

Figura 101

Resultado de la prueba t-student para diseño de concreto con relación $a/c=0,45$ con adición y con adición 20% de puzolana

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales

	0.45 - sin adición	0.45 - 20%PU
Media	4.88E-12	3.7825E-13
Varianza	6.62457E-25	2.53425E-27
Observaciones	8	4
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	7	
Estadístico t	15.58448265	
P(T<=t) una cola	5.41373E-07	
Valor crítico de t (una cola)	1.894578605	
P(T<=t) dos colas	1.08275E-06	
Valor crítico de t (dos colas)	2.364624252	

Prueba de Hipótesis:

Se rechaza la hipótesis H0, por tanto las medias son diferentes

Nota: elaboración propia.

Del resultado de la prueba de t – Student, se puede concluir que en los diseños de concreto con relación $a/c=0.45$, la adición de 20% de puzolana reduce el coeficiente de permeabilidad del concreto, en comparación a los concretos sin adición.

K. Diseño de concreto con relación $a/c=0,50$ (sin adición y con 20% de Puzolana)

Figura 102

Resultado de la prueba F- Snedecor para diseño de concreto con relación $a/c=0,50$ sin adición y con adición 20% de puzolana

Prueba F para varianzas de dos muestras

	0.50 - sin adición	0.50 - 20%PU
Media	1.09922E-11	8.765E-13
Varianza	2.15599E-24	8.15457E-26
Observaciones	9	4
Grados de libertad	8	3
F	26.43910501	
P(F<=f) una cola	0.010583036	
Valor crítico para F (una cola)	8.84523846	

Prueba de Hipótesis:

Se rechaza la hipótesis H0, por tanto las varianzas son diferentes

Nota: elaboración propia.

Figura 103

Resultado de la prueba t-student para diseño de concreto con relación a/c=0,50 con adición y con adición 20% de puzolana

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales

	0.50 - sin adición	0.50 - 20%PU
Media	1.09922E-11	8.765E-13
Varianza	2.15599E-24	8.15457E-26
Observaciones	9	4
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	9	
Estadístico t	19.84080121	
P(T<=t) una cola	4.87125E-09	
Valor crítico de t (una cola)	1.833112933	
P(T<=t) dos colas	9.74249E-09	
Valor crítico de t (dos colas)	2.262157163	

Prueba de Hipótesis:

Se rechaza la hipótesis H0, por tanto las medias son diferentes

Nota: elaboración propia.

Del resultado de la prueba de t – Student, se puede concluir que en los diseños de concreto con relación a/c=0.50, la adición de 20% de puzolana reduce el coeficiente de permeabilidad del concreto, en comparación a los concretos sin adición.

L. Diseño de concreto con relación a/c=0,55 (sin adición y con 20% de Puzolana)

Figura 104

Resultado de la prueba F- Snedecor para diseño de concreto con relación a/c=0,55 sin adición y con adición 20% de puzolana

Prueba F para varianzas de dos muestras

	0.55 - sin adición	0.55 - 20%PU
Media	1.92333E-11	9.8675E-13
Varianza	2.80975E-23	1.03956E-26
Observaciones	9	4
Grados de libertad	8	3
F	2702.830529	
P(F<=f) una cola	1.07199E-05	
Valor crítico para F (una cola)	8.84523846	

Prueba de Hipótesis:

Se rechaza la hipótesis H0, por tanto las varianzas son diferentes

Nota: elaboración propia.

Figura 105

Resultado de la prueba t-Student para diseño de concreto con relación a/c=0,55 con adición y con adición 20% de puzolana

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales

	0.55 - sin adición	0.55 - 20%PU
Media	1.92333E-11	9.8675E-13
Varianza	2.80975E-23	1.03956E-26
Observaciones	9	4
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	8	
Estadístico t	10.3225805	
P(T<=t) una cola	3.34679E-06	
Valor crítico de t (una cola)	1.859548038	
P(T<=t) dos colas	6.69359E-06	
Valor crítico de t (dos colas)	2.306004135	

Prueba de Hipótesis:

Se rechaza la hipótesis H0, por tanto las medias son diferentes

Nota: elaboración propia.

Del resultado de la prueba de t – Student, se puede concluir que en los diseños de concreto con relación a/c=0.55, la adición de 20% de puzolana reduce el coeficiente de permeabilidad del concreto, en comparación a los concretos sin adición.

Aplicación de Redes Neuronales artificiales para el pronóstico del coeficiente de permeabilidad.

Utilizando los datos de permeabilidad y datos de fabricación de las muestras de concreto, se identificaron 16 variables de fabricación.

En la tabla 99 se presentan los factores de correlación entre cada una de las variables con la permeabilidad del concreto.

Tabla 99

Correlación de las variables de fabricación del concreto con el coeficiente de permeabilidad del concreto

<i>Variables</i>	Fila	Min	Max	Media	Moda	Std	CCR
Adición: 1;2;3;4	1	1	4	2.5	2	1.12	0.43
Relación A/MC	2	0.4	0.65	0.5	0.55	0.07	0.43
% de Adición	3	0	0.2	0.08	0.1	0.06	-0.43
Cemento (kg)	4	238	380	306.6	324	37.99	0.21
Adición (kg)	5	0	76	26.23	0	20.93	-0.42
Agua (kg)	6	144	208	165.06	165	14.71	0.59
Arena (kg)	7	887.9	1162	992.78	975	93.35	-0.11
Piedra (kg)	8	78	1006	881.23	804	146.59	-0.06
Aditivo (kg)	9	4.2	7.6	5.56	4.8	0.88	-0.14
Edad (días)	10	28	56	42	28	26.6	-0.09
MF de Arena	11	2.82	3.02	2.94	2.97	0.07	-0.15
Contenido de SiO₂ (%)	13	0	0.93	0.5	0.93	0.35	-0.48
Contenido de Al₂O₃(%)	14	0	0.34	0.09	0	0.14	-0.2
Contenido de Fe₂O₃ (%)	15	0	0.22	0.05	0.01	0.08	-0.2
PE de adición (g/cm³)	16	0	2.7	1.78	2.2	1.11	-0.53
Permeabilidad (m/s)	17	1.20×10^{-14}	7.33×10^{-11}	8.21×10^{-12}	3.28×10^{-12}	8.40×10^{-14}	1

Nota: elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla anterior; las mayores correlaciones entre las variables de fabricación y la permeabilidad se obtuvieron para:

- Agua (59%); Peso específico de la adición (53%). Contenido de SiO₂ (%) (48%); Relación agua/material cementante (43%); % de adición (-43%)

Para la búsqueda de la red que más aproxime el pronóstico se postularon 6 estructuras de redes, que se muestran en la tabla 100.

Tabla 100

Creación de seis estructuras de RNBP

N°	Estructura	funciones de transferencia	entrenamiento
1	[10, 20, 20, 1]	'tansig' 'tansig' 'tansig' 'purelin'	'trainlm'
2	[15, 40, 40, 1]	'tansig' 'tansig' 'tansig' 'purelin'	'trainlm'
3	[10, 12, 13, 1]	'tansig' 'tansig' 'tansig' 'purelin'	'trainlm'
4	[7, 4, 1]	'tansig' 'tansig' 'purelin'	'trainlm'

5	[20, 20, 5, 1]	'tansig'	'tansig'	'tansig'	'purelin'	'trainlm'
6	[11 ,20, 30, 1]	'tansig'	'tansig'	'tansig'	'purelin'	'trainlm'

Nota: elaboración propia.

Entrenamiento de las RNBP

Para el presente trabajo se emplearon los datos de fabricación (P) y resultados de permeabilidad (T) de 457 probetas. Con la finalidad de verificar la fortaleza de la red neuronal se separó una quinta parte (Pb), (Tb); empleando clases de equivalencia módulo 5; las 4/5 partes de la base de datos se separaron en 3 grupos, empleando las clases de equivalencia módulo 4, pero restringidas al conjunto de enteros $\{1, 2, \dots, 457\}$, $\text{clas1} = [1, 5, 9, \dots, 365]$; $\text{clas2} = [2, 6, 10, +\dots, 366]$, así sucesivamente hasta $\text{clas4} = [4, 8, 12, \dots, 364]$. Para la fase del entrenamiento se toma clas1 y clas3 , para la validación clas2 y para la prueba clas4 . De este modo se evita hacer divisiones aleatorias. Se emplearon seis estructuras diferentes de redes neuronales las que se corrieron con la misma base de datos.

Normalizacion de los datos

La función que se invoca para el entrenamiento de cada una de las RNBP es:

$$[\text{net}, \text{Est4}] = \text{train}(\text{net}, \text{Enp}, \text{VET}, [], [], \text{Val}, \text{test}) \quad (1)$$

Luego del entrenamiento se pasa a la simulación de cada una de ellas, para obtener su respuesta, empleando la función:

$$\text{re} = \text{sim}(\text{net}, \text{pr}) \quad (2)$$

Luego se convierte “re” a valores en el dominio original, para esto se emplea la siguiente función.

$$\text{Re} = \text{mapstd}(\text{'reverse'}, \text{re}, \text{Est2}) \quad (3)$$

Terminada esta etapa, se calculan para cada una de las (RNBP), los siguientes valores: Correlación entre el valor esperado y la respuesta de la red: R; pendiente de la recta de regresión

lineal: m ; la intersección con el eje Y: b ; el error en media cuadrática: MSE y la raíz del error de media cuadrática: RMSE, los cuales se presentan en la siguiente tabla 101.

Tabla 101

Resultados de los estadísticos: R, m, b, MSE y RMSE

<i>Estructura</i>	<i>R</i>	<i>m</i>	<i>b (x10⁻¹² m/s)</i>	<i>MSE (x10⁻²³ m²/s²)</i>	<i>RMSE (x10⁻¹¹ m/s)</i>
[10, 20, 20, 1]	0.90	0.82	0.590	1.030	0.321
	5	3			
[15, 40, 40, 1]	0.90	0.81	0.675	1.069	0.326
	2	9			
[10, 12, 13, 1]	0.90	0.81	0.688	1.058	0.325
	3	9			
[7, 4, 1]	0.90	0.86	0.621	1.075	0.327
	3	6			
[20, 20, 5, 1]	0.84	0.67	0.923	1.642	0.405
	6	4			
[11, 20, 30, 1]	0.89	0.90	0.687	1.206	0.347
	7	5			

Nota: elaboración propia.

De las 6 estructuras de RBNP, descritas en la tabla 101, se elige la estructura N°1, que tiene la estructura [10, 20, 20, 1] y tiene el valor más alto de correlación igual a 0.905. Se muestran en la Tabla 102, los valores de correlación R y de los coeficientes de la ecuación de la recta, m y b , para las etapas del entrenamiento, validación y prueba; asimismo, se agrega los valores totales.

Tabla 102

La correlación R y los coeficientes m y b de la recta de regresión, para la RBNP N°1

Fases	R	m	b (x10⁻¹² m/s)
Entrenamiento	0.973	0.945	0.157
Validación	0.865	0.647	1.064
Prueba	0.956	1.23	-0.469
Total	0.905	0.822	0.590

Nota: elaboración propia.

El error en valor absoluto $E = |T - Re|$, entre el valor esperado T y la respuesta Re de la RNBP N° 1 se muestra en la Tabla 103; con los valores presentados en la Tabla 103 se puede inferir que el error en valor absoluto, entre T y Re , se encuentra en un 99.7% en el intervalo de clase abierto por la derecha $[0.02, 99.94] \times 10^{-13}$; asimismo se precisa que los errores mayores son solo el 0.27 % del total.

Tabla 103

Error: $E = |T - Re|$

Centros de los Intervalos de clase ($\times 10^{-13}$ m/s) para el error $E = T - Re $	Frecuencia absoluta	Frecuencia relativa
0.02	352	0.9617
99.94	13	0.0355
199.87	0	0
299.8	0	0
399.72	0	0
499.65	1	0.0027

Nota: elaboración propia.

Pronóstico de la RNA para los datos Pb

Como se sabe, empleando la clase de equivalencia módulo 5, se separó la quinta parte de los datos de fabricación (Pb) y de la permeabilidad (Tb). Estos no intervinieron en el entrenamiento de las seis RNBP. Por tanto, para conocer la capacidad de pronóstico de las RNBP, primero se normaliza Pb obteniendo la matriz pbn, luego se le aplica a esta última el análisis de los componentes principales y se tiene que $pbr = M * pbn$, donde M es la matriz que contiene la estructura de la ecuación 2. Finalmente se realiza la simulación utilizando la siguiente función:

$$\mathbf{reb} = \mathbf{sim}(\mathbf{net}, \mathbf{pbr}) \quad (4)$$

La respuesta “reb” se convierte a valores en el dominio original, para esto se hace uso de la función inversa:

$$\text{Reb}=\text{mapstd}(\text{'reverse'},\text{reb},\text{Est2}) \quad (5)$$

Coeficientes: R, m, b, MSE y RMSE

Las tres fases: entrenamiento, validación y prueba, se ejecutan con cada una de las seis RNBP que ya fueron entrenadas en la Tabla 103 y de este modo la idea es medir su capacidad de pronóstico. Para esto se calculan los siguientes valores: R, m, b, MSE y RMSE, los cuales se presentan en la Tabla 104.

Se observa que la capacidad de pronóstico de todas ellas es muy buena y no baja de una correlación de 0.90 en particular la RNBP N° 1 tiene una capacidad de pronóstico con una correlación de 0.95.

Tabla 104

Resultados estadísticos: R, m, b, MSE y RMSE

<i>Estructura</i>	<i>R</i>	<i>m</i>	<i>b (x10⁻¹³ m/s)</i>	<i>MSE (x10⁻²⁴ m²/s²)</i>	<i>RMSE (x10⁻¹³ m/s)</i>
[10, 20, 20, 1]	0.950	0.848	5.22	10.641	0.326
[15, 40, 40, 1]	0.956	0.877	4.39	9.342	0.305
[10, 12, 13, 1]	0.954	0.910	3.89	9.471	0.307
[7, 4, 1]	0.952	0.869	5.57	10.104	0.317
[20, 20, 5, 1]	0.900	0.593	6.13	27.546	0.524
[11, 20, 30, 1]	0.950	0.896	6.16	10.370	0.322

Nota: elaboración propia.

La mayoría de las estructuras de red neuronal, obtuvieron un pronóstico del 95%

VI. CONCLUSIONES

OG: Determinar la permeabilidad del concreto controlada por las adiciones minerales ultrafinas en la mezcla de concreto

- C1: Se determinó la permeabilidad del concreto mediante la aplicación de redes neuronales artificiales; esta red alcanzó una correlación del 95%, RNBP cuya estructura

es [10, 20, 20, 1]; puede ser aplicada para el pronóstico del coeficiente de permeabilidad del concreto con adiciones minerales ultrafinas.

- C2: Mediante el uso de la técnica de regresión lineal múltiple se determinaron ecuaciones, para la determinación del coeficiente de permeabilidad, para cada una de las adiciones evaluadas y las diferentes relaciones agua-cemento consideradas; en todos los casos las correlaciones obtenidas fueron mayores a 85%.
- Se determinó un coeficiente denominado; índice de durabilidad, el cual se propone utilizarlo, para estimar la durabilidad, influenciada por la permeabilidad; este indicador se puede aplicar a partir del conocimiento de la resistencia del concreto con y sin adición.
- Se demostró mediante análisis estadísticos que, en todos los casos de estudio, las adiciones influyeron y disminuyeron los valores del coeficiente de permeabilidad, por lo cual afirmamos que la permeabilidad del concreto es controlada por la cantidad y tipo de adición, así como por la cantidad de agua y edad de curado.
- Para las tres adiciones evaluadas (Microsílice, Metacaolín, puzolana); se mejoraron en todos los casos la impermeabilidad del concreto.

OE1: -Aplicar Microsílice en la mezcla de concreto para controlar la permeabilidad

- La microsíllice controló eficazmente la permeabilidad del concreto logrando disminuir la permeabilidad del concreto hasta 1.7567×10^{-12} m/s, de lo que se puede concluir que la microsíllice es un buen producto para disminuir la permeabilidad.
- Estadísticamente por análisis de varianzas se demostró que después de los 28 días de curado, la permeabilidad del concreto con microsíllice, no varía; y se puede establecer que la determinación de este coeficiente se debe realizar a los 28 días de curado.

- Mediante la red neuronal RNBP encontrada cuya estructura es [10, 20, 20, 1], se puede pronosticar el valor del coeficiente de permeabilidad del concreto con adición de Microsílice, conociendo los datos de fabricación de la mezcla utilizada y con una correlación del 95%.
- Se determinó la ecuación para determinar la permeabilidad teórica; utilizando la técnica de regresión múltiple lineal, con coeficientes de correlación de 85%.

OE2: Aplicar Puzolana en la mezcla de concreto para controlar la permeabilidad

- La puzolana controló eficazmente la permeabilidad del concreto logrando disminuir la permeabilidad del concreto hasta 0.760×10^{-12} m/s, de lo que se puede concluir que la puzolana es un buen producto para disminuir la permeabilidad.
- Mediante la red neuronal RNBP encontrada cuya estructura [10, 20, 20, 1], se puede pronosticar el valor del coeficiente de permeabilidad del concreto con adición de puzolana, conociendo los datos de fabricación de la mezcla utilizada.
- Se determinó la permeabilidad teórica utilizando la técnica de regresión múltiple lineal, lo que permitió obtener ecuaciones con coeficientes de correlación de 87%, para concreto con adición de puzolana
- Se demostró estadísticamente por análisis de varianzas que la permeabilidad del concreto con puzolana no varía después de los 28 días de curado húmedo del concreto.

OE2: Aplicar Metacaolín en la mezcla de concreto para controlar la permeabilidad

- El metacaolín, controló eficazmente la permeabilidad del concreto logrando disminuir la permeabilidad del concreto.
- Se demostró estadísticamente por análisis de varianzas que la permeabilidad del concreto con metacaolín varía después de los 28 días de curado húmedo.

- Mediante la red neuronal RNBP encontrada cuya estructura [10, 20, 20, 1], se puede pronosticar el valor del coeficiente de permeabilidad del concreto con adición de metacaolín, conociendo los datos de fabricación de la mezcla utilizada.
- Se determinó la permeabilidad teórica utilizando la técnica de regresión múltiple lineal, lo que permitió obtener ecuaciones con buenos coeficientes de correlación para concreto con adición de metacaolín.

VII. RECOMENDACIONES

- Investigar el desempeño de otras adiciones en reemplazo parcial del material cementante, como las puzolanas artificiales entre ellas la zeolita o el filler calizo con el fin de disminuir el coeficiente de permeabilidad del concreto.
- Investigar el uso de aditivos impermeabilizantes en la mezcla de concreto, con el fin de disminuir el coeficiente de permeabilidad del concreto y evaluar su efecto a edades tempranas.
- Continuar ampliando la investigación de índice de durabilidad a fin de su estandarización
- Aplicar porcentajes de reemplazos de las adiciones utilizadas en la investigación en mayores proporciones, para caracterizar el efecto de esta variable en el coeficiente de permeabilidad y evaluar su efecto en la resistencia a la compresión a los 28 días.
- Caracterizar el efecto de las adiciones en otras propiedades de interés como la reactividad álcali, carbonatación y otros parámetros de durabilidad.
- Correlacionar los valores de coeficiente de permeabilidad con métodos rápidos para caracterizar la estructura porosa del concreto, como: el método de resistividad eléctrica.

VIII. REFERENCIAS

- ACI 201.2R-01. (2020). Guía para la durabilidad del hormigón. American Concrete Institute.
- ACI 214R-11. (2021). *Guide to Evaluation on Strength Test Results of Concrete*. American Concrete Institute.
- ACI 318S-08. (2019). Requisitos de reglamento para concreto estructural. American Concrete Institute.
- Asociación Española de Normalización y certificación OR. (2021). *Ensayos de hormigón endurecido, parte 8: Profundidad de penetración. UNE EN 12390-8*. Madrid. España: Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR).
- ASTM C 39/C 39M. (2020). *The American Society for Testing Materials, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. West Conshohocken (PA), USA.
- ASTM C1202. (2020). Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.
- ASTM C 496/C 496M. (2020). *The American Society for Testing Materials Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. West Conshohocken (PA).
- ASTM C642 - 13. (2020). *The American Society for Testing Materials Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. West Conshohocken (PA), USA.
- Ahari, S., Erdem, K., y Ramyar, K. (2015). Permeability properties of self-consolidating concrete containing various supplementary cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 79, 326-336.

- Ahmad, S., Own, k., Kolawolwe, S., y Al-Dulaijan, S. (2019). Influence of admixing natural pozzolan as partial replacement of cement and microsilica in UHPC mixtures. *Construction and Building Materials*, 437-444.
- Aire, C., y Reyes, A. (2019). Durable concrete specification development and implementation for the New International Airport of Mexico. *Case Studies in Construction Materials*, 1-13.
- Al-Swaidani, A. (2019). Use of micro and nano volcanic scoria in the concrete binder: Study of compressive strength, porosity and sulfate resistance. *Case Studies in Construction Materials*, 2214-5095.
- Al-Swaidani, A. (2019). Use of micro and nano volcanic scoria in the concrete binder: Study of compressive strength, porosity and sulfate resistance. *Case Studies in Construction Materials*, 2214-5095. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00294>
- Al-Swaidani, A., Khwies, W., Al-baly, M., y Lala, T. (2022). Development of multiple linear regression, artificial neural networks and fuzzy logic models to predict the efficiency factor and durability indicator of nano natural pozzolana as cement additive. *Journal of Building Engineering*, 2352-7102. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104475>
- Barbudo, S., y Borges, P. (2001). Acción de los agentes químicos y físicos sobre el concreto. IMCYC.
- Bermejo, B., y Moragues, A. (2008). Permeabilidad de hormigones autocompactados. *Ier Congreso Español sobre Hormigon autocompactante* (págs. 533-541). valencia: Departamento de Ingeniería civil y Construcción-Universidad Politécnica de Madrid.
- Bustamante, I. G. (2017). Estudio de la correlación entre la relación agua cemento y la permeabilidad al agua de concretos en el Perú. Lima, Lima, Perú: PUCP.
- Córdova, N., y Carolina, M. (2013). *Niveles de investigación: Predictiva, proyectiva, interactiva, confirmatoria y evaluativa.*

- Cruz, D. (2014). Mejoramiento del efecto barrera en materiales endurecidos de cemento Portland mediante una aplicación innovadora de nano-partículas de silicio. Ciudad Universitaria, México: Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Cruz, J. C. (2015). Comparative study on porosity and permeability of conventional concrete and concrete with variable proportions of natural zeolite additions. *Revista de la construcción*, 72-78 vol14 N°3.
- Flórez, C., y Mosquera, J. (2013). La relación ser humano–naturaleza frente a los derechos fundamentales en el territorio. *Rev. Alimentos Hoy*. Asociación Colombiana de Ciencia y Tecnología de Alimentos, 79-96.
- Garzón., W. (2013). Estudio de durabilidad al ataque de sulfatos del concreto con agregado reciclado. Bogotá, Colombia, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Gómez, C. (2008). Identificación y cuantificación de algunos factores en la permeabilidad de concretos y morteros. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Güneysi, E., Gesoglo, M., y Özbay, E. (2011). Permeation properties of Self-Consolidating Concretes with Mineral Asmixtures. *ACI Material Journal*, 108(2), 150-158.
- Gurdián, H., Garcés, P., Zornoza, E., y Garcia, E. (2015). *Durabilidad de hormigones con adiciones puzolánicas y árido reciclado*. Lisboa: CONPAT
- Helene, P., Guignone, G., Vieira, G., Roncetti, L., y Moroni, F. (2018). Evaluation of the chloride penetration and service life of self-healing concretes activated by crystalline catalyst. (IBRACON, Ed.) *Ibracon Estructura y Materiales*, Vol 11 (3), 544-563.
- Hossein, A., Yaraghi, Y., Mohammad, M., Ramezani-pour, A., Bahman-Zadeh, F., y Zolfagharnasab, A. (2022). Evaluation of test procedures for durability and permeability assessment of concretes containing calcined clay. *Journal of Building Engineering*. 58(105016). <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105016>

- Huerta, G. (2019). Determinación del coeficiente de permeabilidad como parámetro de durabilidad en concreto con adición de microsilice. Lima, Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Instituto Colombiano de normas técnicas y certificación. (2018). *Ingeniería civil y arquitectura. Concretos. Método de ensayo para determinar la permeabilidad del concreto al agua. NTC 4483.*
- Khotbehsara, M., Mohseni, E., Ozbakkaloglu, T., y Ranjbar, M. (2017). Durability Characteristics of Self-Compacting Concrete Incorporating Pumice and Metakaolin. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(11).
- Kropp, J., y Hilsdorf, H. (2005). *Performance Criteria for Concrete Durability*. London: E & FN SPON.
- Lizarazo, J., y López, L. (2012). Effect of silica fume addition on the chloride -related transport properties of high-performance concrete. *Dyna*, 79(171), 105-110.
- López, J. (2004). Porosidad del concreto. Ciudad de Guatemala, Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Mehta, P., y Monteiro, P. (2006). *Concrete Microstructure, Properties, and Materials*. New York: McGraw Hill.
- Mejía, R., Rodríguez, C., Rodríguez, E., Torres, J., y Delvasto, S. (2009). Concreto adicionado con metacaolín: Comportamiento a carbonatación y cloruros. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia N°48*, 55-64.
- Mohammadreza, E., Vessalas, K., Sirivivatnanon, V., y Baweja, D. (2017). Influence of Permeability-Reducing Admixtures on Water. *ACI Materials Journal*, 114(6), 911-922.
- Moreno, A. (2015). Implementación del método de presión para medir la permeabilidad en el concreto. Lima, Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.

- Multon, S., Verdier, J., Villain, G., Sogbossi, H., Dérobert, X., Cagnon, H., y Balayssac, J. (2022). Non-destructive measurements for the evaluation of the air permeability of concrete structures. *Measurement*, 196, 111-204. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111204>
- Murphy, T., y Lau, A. (2008). Manejo de valores atípicos. USA: Magazines & Newsletters/ASTMStandardization News.
- Najimi, M., Sobhani, J., Ahmadi, B., y Shekarchi, M. (2012). An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan. *Construction and Building Materials*, 35, 1023-1033.
- Nas, M., y Kurbetci, S. (2018). Durability properties of concrete containing metakaolin. *Advances in Concrete Construction*, 6(2), 159-175.
- Oparin, A. (1923). El origen de la vida. Moscú, Rusia.
- Ramezaninpour, A. y Jovein, H. (2012). Influence of metakaolin as supplementary cementing material on strength and durability of concretes. *Construction and Building Materials*, 30, 470-479.
- Sadrmomtazi, A., Tahmouresi, B., y Khoshkbijari, R. (2017). Effect of fly ash and silica fume on transition zone, pore structure and permeability of concrete. *Magazine of Concrete Reserach*, 70(10), 519-532.
- Salih, M. (2018). Strenght and durability of high performance concrete containing fly ash and micro silica. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 9(9), 104-114.
- San Juan, M. y Castro, P. (2001). *Accion de los agentes quimicos y fisicos en el concreto* (1 ed.). IMCYC.
- Sicha, G. (2019). Influencia de la adición del metacaolín en la permeabilidad del concreto de cemento portland. Lima, Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.

Torres, J. (2011). Efecto del porcentaje de adición de metacaolín en las propiedades finales del concreto adicionado. *Ingeniería y Universidad*, 1(15), 77-90.

Valderrama, P., Torres, J., & Mejia, R. (abril de 2011). Características de desempeño de un concreto adicionado con cenizas volantes de alto nivel. *Ingeniería e Investigación*, 31(1), 39-46.

IX. ANEXOS

ANEXO A.

MATRIZ DE CONSISTENCIA

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables e indicadores			Metodología			
PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPOTESIS PRINCIPAL	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	TIPO DE INVESTIGACIÓN			
¿De qué manera la adición de minerales ultrafino en la mezcla de concreto, influye en la permabilidad del concreto?	Adicionar minerales ultrafinos en la mezcla de concreto con la finalidad de disminuir su permeabilidad.	La aplicación de minerales ultrafinos en el proceso de mezclado afectaría la permeabilidad del concreto.	VARIABLE INDEPENDIENTE				_Investigación		
			X: Adiciones minerales ultrafinas	X1: Microsílice	X1.1: 5%	Aplicada			
				X2: Puzolana	X1.2: 10%	_Investigación			
				X3: Metacaolín	X2.1: 10%	Experimental			
						X2.2: 15%	_Investigación		
						X2.3: 20%	Prospectiva		
						X3.1: 10%	_Investigación		
						X3.2: 15%	Retrolectiva		
						VARIABLE DEPENDIENTE			_Investigación
						Y: Permeabilidad del concreto en estado endurecido	Y1: Muestras cilíndricas de concreto	Y1.1: Coeficiente de permeabilidad (m/s)	Transversal
			VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	_Investigación			
PROBLEMAS SECUNDARIOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPOTESIS SECUNDARIAS				Comparativa			
						NIVEL DE INVESTIGACIÓN			
VARIABLE INDEPENDIENTE									

a) ¿De qué manera la aplicación de microsílíce en la mezcla de concreto, influye en la permabilidad del concreto?	a) Aplicar microsílíce en la mezcla de concreto con la finalidad de disminuir su permeabilidad en estado endurecido.	a) La aplicación de microsílíce en la mezcla de concreto disminuiría la permeabilidad del concreto en estado endurecido.	X: Microsílíce	X1: Porcentaje de reemplazo del material cementante.	X1.1: 5% X1.2: 10%	El nivel de la investigación es Nivel IV, predictivo II.
			VARIABLE DEPENDIENTE			
			Y: Permeabilidad del concreto en estado endurecido	Y1: Muestras cilíndricas de concreto	Y1.1: Coeficiente de permeabilidad (m/s)	Métodos
b) ¿De qué manera la aplicación de puzolana en la mezcla de concreto influye en la permabilidad del concreto?	b) Aplicar puzolana en la mezcla de concreto con la finalidad de disminuir su permeabilidad en estado endurecido.	b) La aplicación de puzolana en la mezcla de concreto disminuiría la permeabilidad del concreto en estado endurecido.	VARIABLE INDEPENDIENTE			
			X: Puzolana	X1: Porcentaje de reemplazo del material cementante.	X1.1: 10% X1.2: 15% X1.3: 20%	_Experimental _Analítico _Analógica _Hipotético- deductivo
			VARIABLE DEPENDIENTE			
			Y: Permeabilidad del concreto en estado endurecido	Y1: Muestras cilíndricas de concreto	Y1.1: Coeficiente de permeabilidad (m/s)	
c) ¿De qué manera la aplicación de metacaolín en la mezcla de concreto, influye en la permabilidad del concreto?	c) Aplicar metacaolín en la mezcla de concreto con la finalidad de disminuir su permeabilidad en estado endurecido.	c) La aplicación de metacaolín en la mezcla de concreto disminuiría la permeabilidad del concreto en estado endurecido.	VARIABLE INDEPENDIENTE			
			X: Metacaolín	X1: Porcentaje de reemplazo del material cementante.	X1.1: 10% X1.2: 15%	
			VARIABLE DEPENDIENTE			
			Y: Permeabilidad del concreto en estado endurecido	Y1: Muestras cilíndricas de concreto	Y1.1: Coeficiente de permeabilidad (m/s)	

ANEXO B.**FORMATO DE PESO UNITARIO Y CONTENIDO DE HUMEDAD****1.0. IDENTIFICACIÓN DE LOS MATERIALES**

	Ag. Fino	Ag. Grueso	Hormigón
Tipo			
Procedencia			

2.0. PESO UNITARIO**A. PESO UNITARIO SUELTO**

	Ag. Fino	Ag. Grueso	Hormigón
Peso de la muestra + Recipiente (Kg)			
Peso del recipiente (Kg)			
Peso de la muestra (Kg)			
Volumen del recipiente (m ³)			
Peso unitario suelto (Kg / m ³)			

B. PESO UNITARIO COMPACTADO

	Ag. Fino	Ag. Grueso	Hormigón
Peso de la muestra + Recipiente (Kg)			
Peso del recipiente (Kg)			
Peso de la muestra (Kg)			
Volumen del recipiente (m ³)			
Peso unitario compactado (Kg / m ³)			

3.0. CONTENIDO DE HUMEDAD

	Ag. Fino	Ag. Grueso	Hormigón
Peso de la muestra en estado ambiental (g)			
Peso de la muestra seca al horno (g)			
Peso del agua perdida (g)			
Contenido de humedad (%)			

4.0. OBSERVACIONES**Realizado por:**

ANEXO C.**FORMATO DE PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN****1.0. AGREGADO FINO****Basado en la Norma Técnica: NTP 400.022**

Procedencia: _____

Peso de la arena superficialmente seca	
Peso de la arena superficialmente seca + peso del balón + peso del agua	
Peso del balón	
Peso del agua W	
Peso de la arena seca al horno A	
Volumen del balón V	
Peso específico de masa A/ (V – W)	
Peso específico de masa superficialmente seco 500/(V – W)	
Pesos específico aparente A/ (V – W) – (500 – A)	
Porcentaje de absorción (500 – A) X 100/A	

2.0. AGREGADO GRUESO**Basado en la Norma Técnica: NTP 400.021**

Procedencia: _____

Peso de la muestra secada al horno A	
Peso de la muestra saturada superficialmente seca B	
Peso de la muestra saturada en agua + peso de la canastilla	
Peso de la canastilla	
Peso de la muestra saturada en agua C	
Peso específico de masa A/ (B – C)	
Peso específico de masa superficialmente seco B/ (B – C)	
Peso específico aparente A/(A – C)	
Porcentaje de absorción (B – A) X 100/A	

3.0. HORMIGÓN

Procedencia: _____

Peso de la muestra secada al horno A	
Peso de la muestra saturada superficialmente seco B	
Volumen de agua desplazada C	
Peso específico de masa A/C	
Peso específico de masa superficialmente seco B/C	
Porcentaje de absorción (B – A) X100/A	

Realizado por:

ANEXO E.

Figura 106

Hoja de cálculo para diseño de concreto

DISEÑO DE CONCRETO

a/mc	0.4
aire	1.50%
cemento	3150 kg/m ³
adición	2150 kg/m ³
aditivo	1220 kg/m ³

acorde al TNM

1190 1250 kg/m³

cementante	360 kg/m ³
agua	144 kg/m ³
aditivo	7.2 kg

recomendaciones de la norma UNE EN por durabilidad

DOSIFICACIONES MINIMAS POR DURABILIDAD UNE Y ACI 318	
0.4	360
0.45	360
0.5	320
0.55	300
0.6	280
0.65	260

Reemplazo por adición

cemento	324 kg/m ³
adición	36 kg/m ³

porcentaje de reemplazo de ADICIÓN	10%
dosificación de aditivo SIKAMENT TM 140	2 % del Peso cementante

Volumen de la pasta

Cemento	0.103
Adición	0.017
Agua	0.144
Aire	0.015
Aditivo	0.00590
Total	0.285 m³

Vcementante para Bolomey 0.120

Volumen de agregado

0.715 m³

%arena	55%	0.39 m ³
%piedra	45%	0.32 m ³

Tanda de diseño por m³

Cemento	324.0 kg
Adición	36.0 kg
Agua	144 Litros
Arena	991.7 kg
Piedra	866.1 kg
Aditivo	7.20 kg

agua corregida

arena	5.65 Litros
piedra	-4.33 Litros

Tanda en obra por m³

Cemento	324.0 kg
Adición	36.0 kg
Agua	142.7 Litros
Arena	1023.4 kg
Piedra	867.8 kg
Aditivo	7.20 kg
Total	2401.1

	absorción (%)	humedad (%)	peso específico (kg/m ³)	puc (kg/m ³)	pus (kg/m ³)
arena	2.63	3.20	2520	1815	1692
piedra	0.70	0.20	2690	1515	1391

Tanda en laboratorio

Cemento	16.200 kg
Adición	1.80 kg
Agua	7.134 Litros
Arena	51.171 kg
Piedra	43.392 kg
Aditivo	360.00 g
Total	0.05 m³

Nota: elaboración propia.

ANEXO F.

FORMATO DE MEZCLADO DE CONCRETO

DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO			
SOLICITANTE:			
PROYECTO:			
TÉCNICO:			

AGREGADOS	ITEM	ARENA	PIEDRA
	P.e	2.52	2.69
	P.U.S	1692	1391
	P.U.C	1815	1515
	Abs (%)	2.63	0.7
	Hum (%)	3.2	0.2
	TNM	--	3/4"
	MF	3.12	6.66
COMBINACIÓN (%)		55	45

CEMENTO	Sol Tipo I	
P.e.	3.15	
Aire	%aire atrap.	1.5
ADICIÓN	Puzolana	
P.e.	2.15	
%Peso Ce.	10%	

ADITIVO	MARCA	SIKAMENT TM 140
P.e.	1.22	
%Peso Ce.	2	

DOSIFICACIONES MINIMAS POR EXPOSICIÓN A HUMEDAD	
0.4	360
0.45	360
0.5	320
0.55	300
0.6	280
0.65	260

Fecha de mezclado:		
Volumen de tanda:	0.050	m ³

a/mc = 0.4				
DISEÑO - 1	MATERIAL	Peso seco (kg)	Peso en obra (kg)	Tanda en laboratorio
	Cemento	324	324	16.2 kg
	Adición	36	36	1.8 kg
	Agua	144	142.7	7.13 L
	Arena	991.7	1023.4	51.17 kg
	Piedra	866.1	867.8	43.39 kg
	Aditivo	7.2	7.2	360 g

Agua agregada		mL
Slump		pulg
Aire		%

Peso unitario del concreto (NTP 339.046)	
Peso del balde (kg)	
Peso del balde + Co. (kg)	
Volumen del balde (p ³)	
P.U. (kg/m ³)	
Rendimiento	

ANEXO H.

FORMATO PARA CARACTERIZACIÓN DE ADICIONES MINERALES

Características físicas y químicas de la adición mineral	
Fuente:	
Fecha de elaboración de ensayo:	

GRAVEDAD ESPECÍFICA (g/cm³)	
BLAINE (SUPERFICIE ESPECÍFICA) (g/cm²)	
CONTENIDO DE SIO₂	
FINURA (DIÁMETRO PROMEDIO)	
PORCENTAJE PASANDO 45 Mm	
PARTÍCULA	
FORMA	
NORMA	

ANEXO I.

FORMATO PARA MEDICIÓN DE VACÍOS PERMEABLES

MEDICIÓN DE VOLUMEN DE VACÍOS PERMEABLES	
SOLICITANTE:	
PROYECTO:	

Identificación del diseño	Edad del concreto (días)	Muestras	Masa inicial	Masa seca al horno (A)	Masa saturada después de la inmersión (B)	Masa saturada después de ebullición en agua (C)	Masa sumergida aparente (D)	Vacios Permeables (%)
		M-1						
		M-2						
		M-3						
		M-1						
		M-2						
		M-3						
		M-1						
		M-2						
		M-3						
		M-1						
		M-2						
		M-3						
		M-1						
		M-2						
		M-3						
		M-1						
		M-2						
		M-3						
		M-1						
		M-2						
		M-3						
		M-1						
		M-2						
		M-3						
		M-1						
		M-2						
		M-3						
		M-1						
		M-2						
		M-3						

Densidad seca global (g/cm ³)	$[A/(C-D)] \cdot \rho = g1$
Densidad aparente (g/cm ³)	$[A/(A-D)] \cdot \rho = g2$
Volumen de vacíos permeables (%)	$(g2 - g1) / g2 \times 100$

ANEXO J.

FORMATO PARA MEDICIÓN DE PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN

MEDICIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN	
SOLICITANTE:	
PROYECTO:	

Identificación del diseño	Edad del concreto (días)	Muestras	Profundidad de penetración		Tiempo de ensayo		
			D1 (cm)	D2 (cm)	Días	Horas	T (s)
		M-1					
		M-2					
		M-3					
		M-4					
		M-5					
		M-6					
		M-1					
		M-2					
		M-3					
		M-4					
		M-5					
		M-6					
		M-1					
		M-2					
		M-3					
		M-4					
		M-5					
		M-6					
		M-1					
		M-2					
		M-3					
		M-4					
		M-5					
		M-6					

ANEXO K.

FORMATO PARA EL CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD DEL CONCRETO

CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD							
SOLICITANTE:							
PROYECTO:							
Identificación del diseño	Edad del concreto (días)	Muestras	Profundidad de penetración promedio (m)	Porosidad (v)	T (s)	Presión (m H ₂ O)	Coefficiente de permeabilidad K (m/s)
		M-1					
		M-2					
		M-3					
		M-4					
		M-5					
		M-6					
		M-1					
		M-2					
		M-3					
		M-4					
		M-5					
		M-6					
		M-1					
		M-2					
		M-3					
		M-4					
		M-5					
		M-6					
		M-1					
		M-2					
		M-3					
		M-4					
		M-5					
		M-6					
		M-1					
		M-2					
		M-3					
		M-4					
		M-5					
		M-6					

Obtención del coeficiente de permeabilidad, según NTC 4483:


$$K = \frac{D^2 v}{2Th}$$

- k: Coeficiente de permeabilidad (m/s)
 D: Profundidad de penetración (m)
 v: Porosidad (ASTM C642)
 T: Tiempo necesario para penetrar la profundidad D (s)
 h: Carga de presión de agua (m)

ANEXO L.


TABLA DE VALORES CRÍTICOS DE LA DISTRIBUCIÓN T DE STUDENT
(CONTRASTE BILATERAL)

Tabla de valores críticos de la distribución t de Student



Niveles de Significancia DOS COLA

	0.500	0.250	0.200	0.100	0.050	0.025	0.020	0.010	0.005
1	1.00	2.41	3.08	6.31	12.71	25.45	31.82	63.66	127.32
2	0.82	1.60	1.89	2.92	4.30	6.21	6.96	9.92	14.09
3	0.76	1.42	1.64	2.35	3.18	4.18	4.54	5.84	7.45
4	0.74	1.34	1.53	2.13	2.78	3.50	3.75	4.60	5.60
5	0.73	1.30	1.48	2.02	2.57	3.16	3.36	4.03	4.77
6	0.72	1.27	1.44	1.94	2.45	2.97	3.14	3.71	4.32
7	0.71	1.25	1.41	1.89	2.36	2.84	3.00	3.50	4.03
8	0.71	1.24	1.40	1.86	2.31	2.75	2.90	3.36	3.83
9	0.70	1.23	1.38	1.83	2.26	2.69	2.82	3.25	3.69
10	0.70	1.22	1.37	1.81	2.23	2.63	2.76	3.17	3.58
11	0.70	1.21	1.36	1.80	2.20	2.59	2.72	3.11	3.50
12	0.70	1.21	1.36	1.78	2.18	2.56	2.68	3.05	3.43
13	0.69	1.20	1.35	1.77	2.16	2.53	2.65	3.01	3.37
14	0.69	1.20	1.35	1.76	2.14	2.51	2.62	2.98	3.33
15	0.69	1.20	1.34	1.75	2.13	2.49	2.60	2.95	3.29
16	0.69	1.19	1.34	1.75	2.12	2.47	2.58	2.92	3.25
17	0.69	1.19	1.33	1.74	2.11	2.46	2.57	2.90	3.22
18	0.69	1.19	1.33	1.73	2.10	2.45	2.55	2.88	3.20
19	0.69	1.19	1.33	1.73	2.09	2.43	2.54	2.86	3.17
20	0.69	1.18	1.33	1.72	2.09	2.42	2.53	2.85	3.15
21	0.69	1.18	1.32	1.72	2.08	2.41	2.52	2.83	3.14
22	0.69	1.18	1.32	1.72	2.07	2.41	2.51	2.82	3.12
23	0.69	1.18	1.32	1.71	2.07	2.40	2.50	2.81	3.10
24	0.68	1.18	1.32	1.71	2.06	2.39	2.49	2.80	3.09
25	0.68	1.18	1.32	1.71	2.06	2.38	2.49	2.79	3.08
26	0.68	1.18	1.31	1.71	2.06	2.38	2.48	2.78	3.07
27	0.68	1.18	1.31	1.70	2.05	2.37	2.47	2.77	3.06
28	0.68	1.17	1.31	1.70	2.05	2.37	2.47	2.76	3.05
29	0.68	1.17	1.31	1.70	2.05	2.36	2.46	2.76	3.04
30	0.68	1.17	1.31	1.70	2.04	2.36	2.46	2.75	3.03
31	0.68	1.17	1.31	1.70	2.04	2.36	2.45	2.74	3.02
32	0.68	1.17	1.31	1.69	2.04	2.35	2.45	2.74	3.01
33	0.68	1.17	1.31	1.69	2.03	2.35	2.44	2.73	3.01
34	0.68	1.17	1.31	1.69	2.03	2.35	2.44	2.73	3.00
35	0.68	1.17	1.31	1.69	2.03	2.34	2.44	2.72	3.00
36	0.68	1.17	1.31	1.69	2.03	2.34	2.43	2.72	2.99
37	0.68	1.17	1.30	1.69	2.03	2.34	2.43	2.72	2.99
38	0.68	1.17	1.30	1.69	2.02	2.33	2.43	2.71	2.98
39	0.68	1.17	1.30	1.68	2.02	2.33	2.43	2.71	2.98
40	0.68	1.17	1.30	1.68	2.02	2.33	2.42	2.70	2.97



Niveles de Significancia UNA COLA


	0.250	0.125	0.100	0.050	0.025	0.013	0.010	0.005	0.003
1	1.00	2.41	3.08	6.31	12.71	25.45	31.82	63.66	127.32
2	0.82	1.60	1.89	2.92	4.30	6.21	6.96	9.92	14.09
3	0.76	1.42	1.64	2.35	3.18	4.18	4.54	5.84	7.45
4	0.74	1.34	1.53	2.13	2.78	3.50	3.75	4.60	5.60
5	0.73	1.30	1.48	2.02	2.57	3.16	3.36	4.03	4.77
6	0.72	1.27	1.44	1.94	2.45	2.97	3.14	3.71	4.32
7	0.71	1.25	1.41	1.89	2.36	2.84	3.00	3.50	4.03
8	0.71	1.24	1.40	1.86	2.31	2.75	2.90	3.36	3.83
9	0.70	1.23	1.38	1.83	2.26	2.69	2.82	3.25	3.69
10	0.70	1.22	1.37	1.81	2.23	2.63	2.76	3.17	3.58
11	0.70	1.21	1.36	1.80	2.20	2.59	2.72	3.11	3.50
12	0.70	1.21	1.36	1.78	2.18	2.56	2.68	3.05	3.43
13	0.69	1.20	1.35	1.77	2.16	2.53	2.65	3.01	3.37
14	0.69	1.20	1.35	1.76	2.14	2.51	2.62	2.98	3.33
15	0.69	1.20	1.34	1.75	2.13	2.49	2.60	2.95	3.29
16	0.69	1.19	1.34	1.75	2.12	2.47	2.58	2.92	3.25
17	0.69	1.19	1.33	1.74	2.11	2.46	2.57	2.90	3.22
18	0.69	1.19	1.33	1.73	2.10	2.45	2.55	2.88	3.20
19	0.69	1.19	1.33	1.73	2.09	2.43	2.54	2.86	3.17
20	0.69	1.18	1.33	1.72	2.09	2.42	2.53	2.85	3.15
21	0.69	1.18	1.32	1.72	2.08	2.41	2.52	2.83	3.14
22	0.69	1.18	1.32	1.72	2.07	2.41	2.51	2.82	3.12
23	0.69	1.18	1.32	1.71	2.07	2.40	2.50	2.81	3.10
24	0.68	1.18	1.32	1.71	2.06	2.39	2.49	2.80	3.09
25	0.68	1.18	1.32	1.71	2.06	2.38	2.49	2.79	3.08
26	0.68	1.18	1.31	1.71	2.06	2.38	2.48	2.78	3.07
27	0.68	1.18	1.31	1.70	2.05	2.37	2.47	2.77	3.06
28	0.68	1.17	1.31	1.70	2.05	2.37	2.47	2.76	3.05
29	0.68	1.17	1.31	1.70	2.05	2.36	2.46	2.76	3.04
30	0.68	1.17	1.31	1.70	2.04	2.36	2.46	2.75	3.03
31	0.68	1.17	1.31	1.70	2.04	2.36	2.45	2.74	3.02
32	0.68	1.17	1.31	1.69	2.04	2.35	2.45	2.74	3.01
33	0.68	1.17	1.31	1.69	2.03	2.35	2.44	2.73	3.01
34	0.68	1.17	1.31	1.69	2.03	2.35	2.44	2.73	3.00
35	0.68	1.17	1.31	1.69	2.03	2.34	2.44	2.72	3.00
36	0.68	1.17	1.31	1.69	2.03	2.34	2.43	2.72	2.99
37	0.68	1.17	1.30	1.69	2.03	2.34	2.43	2.72	2.99
38	0.68	1.17	1.30	1.69	2.02	2.33	2.43	2.71	2.98
39	0.68	1.17	1.30	1.68	2.02	2.33	2.43	2.71	2.98
40	0.68	1.17	1.30	1.68	2.02	2.33	2.42	2.70	2.97

ANEXO M.

Figura 107

Tabla de valores críticos de la distribución t de student (contraste unilateral)

Tabla t-Student



El diagrama muestra una curva de la distribución t de Student con un eje horizontal. Una línea vertical marca el punto t_0 a la derecha del centro. El área bajo la curva a la derecha de t_0 está sombreada en azul, representando el nivel de significancia en un contraste unilateral.

Grados de libertad	0.25	0.1	0.05	0.025	0.01	0.005
1	1.0000	3.0777	6.3137	12.7062	31.8210	63.6559
2	0.8165	1.8856	2.9200	4.3027	6.9645	9.9250
3	0.7649	1.6377	2.3534	3.1824	4.5407	5.8408
4	0.7407	1.5332	2.1318	2.7765	3.7469	4.6041
5	0.7267	1.4759	2.0150	2.5706	3.3649	4.0321
6	0.7176	1.4398	1.9432	2.4469	3.1427	3.7074
7	0.7111	1.4149	1.8946	2.3646	2.9979	3.4995
8	0.7064	1.3968	1.8595	2.3060	2.8965	3.3554
9	0.7027	1.3830	1.8331	2.2622	2.8214	3.2498
10	0.6998	1.3722	1.8125	2.2281	2.7638	3.1693
11	0.6974	1.3634	1.7959	2.2010	2.7181	3.1058
12	0.6955	1.3562	1.7823	2.1788	2.6810	3.0545
13	0.6938	1.3502	1.7709	2.1604	2.6503	3.0123
14	0.6924	1.3450	1.7613	2.1448	2.6245	2.9768
15	0.6912	1.3406	1.7531	2.1315	2.6025	2.9467
16	0.6901	1.3368	1.7459	2.1199	2.5835	2.9208
17	0.6892	1.3334	1.7396	2.1098	2.5669	2.8982
18	0.6884	1.3304	1.7341	2.1009	2.5524	2.8784
19	0.6876	1.3277	1.7291	2.0930	2.5395	2.8609
20	0.6870	1.3253	1.7247	2.0860	2.5280	2.8453
21	0.6864	1.3232	1.7207	2.0796	2.5176	2.8314
22	0.6858	1.3212	1.7171	2.0739	2.5083	2.8188
23	0.6853	1.3195	1.7139	2.0687	2.4999	2.8073
24	0.6848	1.3178	1.7109	2.0639	2.4922	2.7970
25	0.6844	1.3163	1.7081	2.0595	2.4851	2.7874
26	0.6840	1.3150	1.7056	2.0555	2.4786	2.7787
27	0.6837	1.3137	1.7033	2.0518	2.4727	2.7707
28	0.6834	1.3125	1.7011	2.0484	2.4671	2.7633
29	0.6830	1.3114	1.6991	2.0452	2.4620	2.7564
30	0.6828	1.3104	1.6973	2.0423	2.4573	2.7500
31	0.6825	1.3095	1.6955	2.0395	2.4528	2.7440
32	0.6822	1.3086	1.6939	2.0369	2.4487	2.7385
33	0.6820	1.3077	1.6924	2.0345	2.4448	2.7333
34	0.6818	1.3070	1.6909	2.0322	2.4411	2.7284
35	0.6816	1.3062	1.6896	2.0301	2.4377	2.7238
36	0.6814	1.3055	1.6883	2.0281	2.4345	2.7195
37	0.6812	1.3049	1.6871	2.0262	2.4314	2.7154
38	0.6810	1.3042	1.6860	2.0244	2.4286	2.7116
39	0.6808	1.3036	1.6849	2.0227	2.4258	2.7079
40	0.6807	1.3031	1.6839	2.0211	2.4233	2.7045
41	0.6805	1.3025	1.6829	2.0195	2.4208	2.7012
42	0.6804	1.3020	1.6820	2.0181	2.4185	2.6981
43	0.6802	1.3016	1.6811	2.0167	2.4163	2.6951
44	0.6801	1.3011	1.6802	2.0154	2.4141	2.6923
45	0.6800	1.3007	1.6794	2.0141	2.4121	2.6896
46	0.6799	1.3002	1.6787	2.0129	2.4102	2.6870
47	0.6797	1.2998	1.6779	2.0117	2.4083	2.6846
48	0.6796	1.2994	1.6772	2.0106	2.4066	2.6822
49	0.6795	1.2991	1.6766	2.0096	2.4049	2.6800

50	0.6794	1.2987	1.6759	2.0086	2.4033	2.6778
51	0.6793	1.2984	1.6753	2.0076	2.4017	2.6757
52	0.6792	1.2980	1.6747	2.0066	2.4002	2.6737
53	0.6791	1.2977	1.6741	2.0057	2.3988	2.6718
54	0.6791	1.2974	1.6736	2.0049	2.3974	2.6700
55	0.6790	1.2971	1.6730	2.0040	2.3961	2.6682
56	0.6789	1.2969	1.6725	2.0032	2.3948	2.6665
57	0.6788	1.2966	1.6720	2.0025	2.3936	2.6649
58	0.6787	1.2963	1.6716	2.0017	2.3924	2.6633
59	0.6787	1.2961	1.6711	2.0010	2.3912	2.6618
60	0.6786	1.2958	1.6706	2.0003	2.3901	2.6603
61	0.6785	1.2956	1.6702	1.9996	2.3890	2.6589
62	0.6785	1.2954	1.6698	1.9990	2.3880	2.6575
63	0.6784	1.2951	1.6694	1.9983	2.3870	2.6561
64	0.6783	1.2949	1.6690	1.9977	2.3860	2.6549
65	0.6783	1.2947	1.6686	1.9971	2.3851	2.6536
66	0.6782	1.2945	1.6683	1.9966	2.3842	2.6524
67	0.6782	1.2943	1.6679	1.9960	2.3833	2.6512
68	0.6781	1.2941	1.6676	1.9955	2.3824	2.6501
69	0.6781	1.2939	1.6672	1.9949	2.3816	2.6490
70	0.6780	1.2938	1.6669	1.9944	2.3808	2.6479
71	0.6780	1.2936	1.6666	1.9939	2.3800	2.6469
72	0.6779	1.2934	1.6663	1.9935	2.3793	2.6458
73	0.6779	1.2933	1.6660	1.9930	2.3785	2.6449
74	0.6778	1.2931	1.6657	1.9925	2.3778	2.6439
75	0.6778	1.2929	1.6654	1.9921	2.3771	2.6430
76	0.6777	1.2928	1.6652	1.9917	2.3764	2.6421
77	0.6777	1.2926	1.6649	1.9913	2.3758	2.6412
78	0.6776	1.2925	1.6646	1.9908	2.3751	2.6403
79	0.6776	1.2924	1.6644	1.9905	2.3745	2.6395
80	0.6776	1.2922	1.6641	1.9901	2.3739	2.6387
81	0.6775	1.2921	1.6639	1.9897	2.3733	2.6379
82	0.6775	1.2920	1.6636	1.9893	2.3727	2.6371
83	0.6775	1.2918	1.6634	1.9890	2.3721	2.6364
84	0.6774	1.2917	1.6632	1.9886	2.3716	2.6356
85	0.6774	1.2916	1.6630	1.9883	2.3710	2.6349
86	0.6774	1.2915	1.6628	1.9879	2.3705	2.6342
87	0.6773	1.2914	1.6626	1.9876	2.3700	2.6335
88	0.6773	1.2912	1.6624	1.9873	2.3695	2.6329
89	0.6773	1.2911	1.6622	1.9870	2.3690	2.6322
90	0.6772	1.2910	1.6620	1.9867	2.3685	2.6316
91	0.6772	1.2909	1.6618	1.9864	2.3680	2.6309
92	0.6772	1.2908	1.6616	1.9861	2.3676	2.6303
93	0.6771	1.2907	1.6614	1.9858	2.3671	2.6297
94	0.6771	1.2906	1.6612	1.9855	2.3667	2.6291
95	0.6771	1.2905	1.6611	1.9852	2.3662	2.6286
96	0.6771	1.2904	1.6609	1.9850	2.3658	2.6280
97	0.6770	1.2903	1.6607	1.9847	2.3654	2.6275
98	0.6770	1.2903	1.6606	1.9845	2.3650	2.6269
99	0.6770	1.2902	1.6604	1.9842	2.3646	2.6264
100	0.6770	1.2901	1.6602	1.9840	2.3642	2.6259
∞	0.6745	1.2816	1.6449	1.9600	2.3263	2.5758

Nota: Elaboración propia