



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



**“EFICACIA DE LAS REDES NEURONALES ARTIFICIALES RNA
EN LA PREDICCIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y
TRABAJABILIDAD DEL CONCRETO LIGERO CON
POLIESTIRENO EXPANDIDO MODIFICADO MEPS.”**

TESIS

PRESENTADA POR:

ERIK HENRY LUPACA LÓPEZ

LEYTER ADILSON QUISPE HUACASI

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL

PUNO – PERÚ

2022



DEDICATORIA

A Dios por darme salud y fortaleza, en momentos, donde a punto de caer he estado, con toda humildad que desde lo más profundo de mi corazón puedo expresar, dedico esta tesis en primer lugar a él.

A mis padres Eleuterio y Virginia por brindarme todo el apoyo, tiempo que me permitieron alcanzar mis metas personales. A mis hermanos Yelina, Yovana, Jimmy y Brian por todos los consejos y todo el apoyo. Y a mi persona especial Maluu por todo el cariño y amor que me das.

A todos mis amigos por su apoyo incondicional, esto también es posible gracias a todos ellos.

Erik Henry Lupaca López.



DEDICATORIA

A Dios por darme salud y fortaleza, en momentos, donde a punto de caer he estado, con toda humildad que desde lo más profundo de mi corazón puedo expresar, dedico esta tesis en primer lugar a él.

Con eterna gratitud a mis queridos padres William y Olga por el esfuerzo, confianza y todo el apoyo que he recibido a lo largo de este camino llamado vida, por forjar en mí una persona con valores, compromiso y búsqueda del bien común. Gracias por tanto cariño.

A todos mis amigos por su apoyo incondicional, esto también es posible gracias a todos ellos.

Leyter Adilson Quispe Huacasi.



AGRADECIMIENTOS

Primero agradecemos a Dios por darnos fortaleza y salud para permitirnos desarrollar y culminar el presente trabajo.

A la Universidad Nacional del Altiplano – Puno, nuestra alma mater, por todas las experiencias adquiridas y además a nuestra querida Escuela Profesional de Ingeniería Civil, por permitirnos y habernos dado la oportunidad de conocer este maravilloso mundo de la ingeniería y de esta manera poder escalar un peldaño más, en el campo del conocimiento.

Al respetable jurado compuesto por el Ing. Jaime Medina Leiva, Ing. Diana Elizabeth Quinto Gastiaburu y Ing. Boris Jaime Chique Calderón por el veredicto sapiente y justiciero.

A nuestro director de tesis Ing. Mariano Roberto García Loayza por las orientaciones, recomendaciones y sobre todo por su confianza.

Estamos muy agradecidos con todos los ingenieros docentes, por los conocimientos impartidos, quienes con esmero y mucha dedicación nos dieron lo mejor de sí en las aulas de nuestra prestigiosa Escuela Profesional de Ingeniería Civil.

A nuestra querida familia, de la cual estamos muy orgullosos, gracias a ellos estamos cumpliendo un paso más de lograr nuestro propósito en nuestra vida.

A nuestros compañeros de aula, amigos que cultivamos en nuestra vida universitaria, de ustedes nos llevamos grandes recuerdos inolvidables y les agradecemos profundamente.

Erik Lupaca y Leyter Quispe.



INDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

INDICE GENERAL

INDICE DE FIGURAS

INDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

RESUMEN 28

ABSTRACT..... 29

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 30

1.1.1 Contextualización 30

1.1.2 Descripción del problema 30

1.1.3 Formulación del problema 31

1.1.4 Problemas específicos 32

1.2 HIPÓTESIS..... 32

1.2.1 Hipótesis general..... 32

1.2.2 Hipótesis específica 32

1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO 33

1.4 OBJETIVOS 34

1.4.1 Objetivo general..... 34

1.4.2 Objetivo específico 34

1.5 VARIABLES 34

1.5.1 Definición conceptual de variables 34

1.5.2 Operacionalización de variables 35

1.6 MATRIZ DE CONSISTENCIA 35

CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN O MARCO REFERENCIAL 38

2.1.1 Antecedentes a Nivel Internacional 38

2.1.2 Antecedentes a Nivel Nacional 40



2.2 MARCO TEÓRICO	41
2.2.1 Inteligencia Artificial	41
2.2.2 Redes Neuronales Artificiales (RNA)	41
2.2.2.1 Fundamentos biológicos	41
2.2.2.2 Neurona Artificial	42
2.2.2.3 Definición de una red neuronal artificial	44
2.2.2.4 Elementos de una red neural	45
2.2.2.5 Funcionamiento de una red neuronal artificial	46
2.2.2.6 Funciones de activación	47
2.2.2.7 Clasificación de las redes neuronales artificiales.....	50
2.2.2.6 Ventajas.....	54
2.2.3 Modelamiento con redes neuronales artificiales.....	54
2.2.3.1 Arquitectura	56
2.2.3.2 Entrenamiento	56
2.2.3.3 Validación y evaluación de modelos	56
2.2.4 Perceptrón multicapa	58
2.2.5 Parámetros de la red.....	58
2.2.6 Herramientas de aplicación.....	59
2.2.6.1 Lenguaje Matlab	59
2.2.7 Sistema de pronóstico	61
2.2.7.1 Flujo de procesos	62
2.2.7.2 Construcción de la red neuronal base	62
2.2.8 Concreto	64
2.2.8.1 Tipos de concreto	65
2.2.8.2 Elementos del concreto	66
2.2.9 Concreto Ligero	70
2.2.9.1 Clasificación del concreto ligero.....	71
2.2.9.2 Agregados ligeros	71
2.2.9.3 Clasificación de los agregados ligeros	72
2.2.9.4 Propiedades del concreto ligero	72
2.2.10 Poliestireno expandible (EPS)	76
2.2.10.1 Concepto	76
2.2.10.2 Fabricación del poliestireno expandible	76
2.2.10.3 Proceso de fabricación	77



2.2.10.5 Propiedades y aplicaciones	78
2.2.11 EPS como agregado ligero	80
2.2.12 Proceso de fabricación de poliestireno expandido modificado (MEPS)	81
2.2.13 Disponibilidad de los MEPS mediante tratamiento térmico	85
CAPITULO III	
MATERIALES Y MÉTODOS	
3.1 TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	86
3.1.1 Tipo de investigación: Analítico	86
3.1.2 Enfoque de investigación: Cuantitativa	86
3.1.3 Alcance o niveles de la investigación: Correlacional	86
3.1.4 Tiempo de estudio; transeccionales o transversales.....	87
3.1.5 Diseño metodológico de la investigación: Experimental.....	87
3.1.6 Diagrama de flujo	87
3.2 AMBITO DE ESTUDIO	90
3.2.1 Geográficas	90
3.2.2 Tiempo de extensión del proyecto de estudio.....	91
3.3 POBLACIÓN Y MUESTRA	91
3.3.1 Población.....	91
3.3.1.1 Definición de la población	91
3.3.2 Muestra	92
3.3.2.1 Procedimiento de muestreo	92
3.3.2.2 Descripción de la muestra	93
3.4 MATERIALES	99
3.4.1 Cemento portland IP	99
3.4.2 Agregado fino	99
3.4.3 Agregado grueso	99
3.4.4 Agua	100
3.4.5 Esferas de Poliestireno Expandido Modificado (MEPS).....	100
3.5 HERRAMIENTAS INFORMATICAS	100
3.5.1 Matlab	100
3.5.2 Excel	100
3.6 EQUIPOS	100
3.7 METODOS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	101



3.8 TÉCNICAS PARA EL PROCESAMIENTO Y ANALISIS DE INFORMACIÓN	102
.....	102
3.8.1 Análisis estadístico.....	102
3.8.2 Análisis de determinación R^2	102
3.8.3 Análisis de correlación lineal R de Pearson.....	102
3.8.4 Análisis de varianza (ANOVA) de un solo factor	103
3.9 METODOLOGÍA METODOS, INSTRUMENTOS Y PROCEDIMIENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	104
3.9.1 Obtención del agregado	104
3.9.1.1 Agregado fino.	104
3.9.1.2 Obtención del agregado grueso.....	106
3.9.2 Muestreo para materiales de construcción.....	107
3.9.2.1 Obtención de muestra representativa de agregado para realización de los ensayos.	109
3.9.2.2 Método de cuarteo.....	109
3.9.3 Ensayos para la obtención de las propiedades físicas de los agregados	111
3.9.3.1 Contenido de humedad.....	111
3.9.3.2 Análisis granulométrico de los agregados gruesos y finos	114
3.9.3.3 Módulo de fineza de los agregados gruesos y finos.....	117
3.9.3.4 Peso específico y absorción de los agregados finos.....	119
3.9.3.5 Peso específico y absorción de los agregados gruesos	123
3.9.3.6 Peso unitario y porcentaje de vacíos de los agregados	126
3.9.4 Estudio para la elaboración y determinación de las propiedades de las esferas de poliestireno expandido modificado (MEPS)	132
3.9.4.1 Elaboración de las esferas de poliestireno expandido modificado (MEPS)	132
3.9.4.2 Análisis granulométrico de las esferas de poliestireno expandido modificado (MEPS)	134
3.9.4.3 Diámetro promedio de (MEPS)	137
3.9.4.4 Densidad de las esferas de poliestireno expandido modificado (MEPS)	140
3.9.5 Diseño de mezclas de concreto	144
3.9.5.1 Materiales.....	144
3.9.5.2 Diseño de mezclas de concreto patrón $f'c210$ kg/cm ²	145



3.9.5.3 Proporción de los componentes del concreto con sustitución por esferas de poliestireno expandido modificado MEPS.....	171
3.9.6 Elaboración de probetas de concreto y curado en laboratorio	178
3.9.6.1 Elaboración de concreto.....	178
3.9.6.2 Elaboración de probetas cilíndricas.	181
3.9.6.3 Curado del concreto.	183
3.9.7 Ensayos realizados	184
3.9.7.1 Ensayos del concreto fresco.....	184
3.9.7.2 Ensayos del concreto endurecido.....	186
3.10 DISEÑO DE LAS REDES NEURONALES ARTIFICIALES PARA LA PREDICCIÓN.....	198
3.10.1 Red Neuronal Artificial para la resistencia a la compresión.....	198
3.10.1.1 Selección de la data para variables de entrada y salida para la elaboración de la RNA	198
3.10.1.2 Arquitectura para la RNA para la resistencia a la compresión.	201
3.10.1.3 Entrenamiento de las RNA para resistencia a la compresión.	204
3.10.1.4 Elaboración de modelos de RNA en Matlab.....	206
3.10.1.5 Validación y evaluación de modelos de RNA para la predicción de la resistencia a la compresión.	218
3.10.2 Red Neuronal Artificial para trabajabilidad del concreto.....	218
3.10.2.1 Selección de la data para variables de entrada RNA	218
3.10.2.2 Arquitectura de la RNA para la trabajabilidad del concreto.	221
3.10.2.3 Entrenamiento de las RNA para la trabajabilidad del concreto.....	224
3.10.2.4 Elaboración de modelos de RNA en Matlab.....	225
3.10.2.5 Validación y evaluación de modelos.	235
CAPITULO IV	
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
4.1 RESULTADOS DE PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS AGREGADOS.....	236
4.1.1 Resultados de contenido de humedad.	236
4.1.2 Resultados de análisis granulométrico	237
4.1.2.1 Análisis granulométrico agregado fino	237
4.1.2.2 Análisis granulométrico agregado grueso.....	238
4.1.3 Resultados de módulo de fineza	239
4.1.4 Resultados de Peso específico y absorción del agregado fino.....	240



4.1.5 Resultados de Peso específico y absorción del agregado grueso.....	241
4.1.6 Resultados de peso unitario suelto seco (PUSS) y compactado (PUCS).....	242
4.1.6.1 PUSS y PUCS del Agregado fino.....	242
4.1.6.1 PUSS y PUCS del Agregado grueso.....	243
4.2 RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES DE ESFERAS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO MODIFICADO (MEPS)	244
4.2.1 Resultados de análisis granulometría de las esferas de poliestireno expandido modificado (MEPS)	244
4.2.1.1 Resultados análisis granulometría MEPS sometidos a temperatura de 110°C	244
4.2.1.2 Resultados análisis granulometría MEPS sometidos a temperatura de 130°C	245
4.2.1.3 Resultados análisis granulometría MEPS sometidos a temperatura de 145°C	246
4.2.2 Resultados de diámetro promedio de las esferas de poliestireno expandido modificado (MEPS)	247
4.2.3 Resultados de densidad de las esferas de poliestireno expandido modificado (MEPS)	248
4.2.3.1 Resultado de densidad de MEPS 110°C	248
4.2.3.2 Resultado de densidad de MEPS 130°C	249
4.2.3.3 Resultado de densidad de MEPS 145°C	249
4.3 RESULTADO DE ENSAYOS REALIZADOS.....	250
4.3.1 Resultados ensayos de concreto fresco	250
4.3.1.1 Resultado de ensayo de concreto fresco trabajabilidad SLUMP por el método ACI-211 con sustitución por MEPS.....	250
4.3.1.2 Resultado de ensayo de concreto fresco trabajabilidad SLUMP por el método módulo de fineza de la combinación de agregados con sustitución por MEPS.	251
4.3.1.3 Resultado de ensayo de concreto fresco trabajabilidad SLUMP por el método WALKER con sustitución por MEPS.....	252
4.3.2 Resultados del concreto endurecido.....	253
4.3.2.1 Resultado de ensayo de resistencia a la compresión del concreto	253
4.3.2.2 Resultados de ensayo de determinación de la densidad, absorción y volumen de vacíos.....	262



4.4 RESULTADO de los modelos DE REDES NEURONALES ARTIFICIALES	268
4.4.1 Resultados de los modelos de RNA para la resistencia a la compresión.....	268
4.4.1.1 Resultados de modelo RNA_FC_A para 16 variables de entrada.	268
4.4.1.2 Resultados de modelo RNA_FC_B para 13 variables de entrada.	273
4.4.1.3 Resultados de modelo RNA_FC_C para 10 variables de entrada.	278
4.4.1.4 Resultados de modelo RNA_FC_D para 8 variables de entrada.	283
4.4.2 Resultado de los modelos de RNA para trabajabilidad del concreto.....	289
4.4.2.1 Resultados de modelo RNA_S_A para 12 variables de entrada.	289
4.4.2.2 Resultados de modelo RNA_S_B para 9 variables de entrada.	295
4.4.2.3 Resultados de modelo RNA_S_C para 6 variables de entrada.	299
4.5 ANÁLISIS DE COSTOS Y TIEMPOS	304
4.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	307
4.6.1 Análisis estadístico del coeficiente de determinación y coeficiente de correlación de PEARSON.	307
4.6.2 Análisis estadístico de los modelos de RNA para la predicción de la resistencia a la compresión del concreto f^c	308
4.6.2.1 Análisis estadístico de los modelos de RNA por el número de neuronas en capa oculta.....	308
4.6.2.2 Consolidado del análisis estadístico modelos de RNA.....	316
4.6.3 Análisis estadístico de los modelos de RNA para la predicción de la trabajabilidad del concreto.....	316
4.6.3.1 Análisis estadístico de los modelos de RNA por el número de neuronas en capa oculta.....	316
4.6.3.2 Consolidado del análisis estadístico modelos de RNA.....	321
4.7 VALIDACIÓN DE HIPÓTESIS	322
4.8 PRUEBA DE HIPOTESIS	324
4.8.1 Prueba de hipótesis modelos de RNA para la predicción de la resistencia a la compresión del concreto f^c	325
4.8.1.1 Prueba de hipótesis utilizando análisis de varianza ANOVA para modelos de RNA para la predicción de la resistencia a la compresión del concreto f^c	327
4.8.2 Prueba de hipótesis modelos de RNA para la predicción de la trabajabilidad del concreto.....	328



4.8.1.1 Prueba de hipótesis utilizando análisis de varianza ANOVA para modelos de RNA para la predicción de la trabajabilidad del concreto SLUMP.	330
4.9 DISCUSIÓN DE RESULTADOS	331
4.9.1 Modelo de Red Neuronal Artificial para predecir la resistencia a la compresión del concreto con MEPS.	331
4.9.2 Modelo de Red Neuronal Artificial para predecir la trabajabilidad del concreto con MEPS.	331
4.9.3 Arquitectura de red neuronal artificial más eficaz para la predicción de la resistencia a compresión y trabajabilidad en concreto ligero con MEPS.	332
V. CONCLUSIONES	335
5.1 CONCLUSIONES GENERAL.....	335
5.2 CONCLUSIONES ESPECIFICAS.....	335
VI. RECOMENDACIONES	337
VII. REFERENCIAS.....	338

TEMA: Predicción de la resistencia a compresión y trabajabilidad de concreto ligero MEPS con el uso de Redes Neuronales Artificiales.

ÁREA: Construcciones.

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Construcciones y Gerencia.

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 22 de julio de 2022



INDICE DE FIGURAS

Figura 1:	Neurona Biológica (Elementos Naturales).	42
Figura 2:	Modelo de una neurona.....	43
Figura 3:	Esquema básico de una red.	45
Figura 4:	Estructura y funcionamiento de una neurona artificial.	47
Figura 5:	Función escalón.....	48
Figura 6:	Función lineal.....	48
Figura 7:	Función logística.	49
Figura 8:	Función tangente hiperbólica.	49
Figura 9:	Función gaussiana.....	50
Figura 10:	Clasificación de las RNA.....	50
Figura 11:	Red Neuronal Artificial de una capa o monocapa.	51
Figura 12:	Red neuronal artificial multicapa.	52
Figura 13:	Flujo de métodos propuesto para el predicción de la resistencia a compresión y trabajabilidad del concreto.	62
Figura 14:	Esquema del diseño de la red neural – MATLAB.	63
Figura 15:	Proporciones típicas en volumen absoluto de los componentes del concreto	66
Figura 16:	Clasificación de concreto ligero de acuerdo a su producción.....	71
Figura 17:	Agregados ligeros naturales como (a) pumita y (b) diatomita, y artificiales como (c) arcilla expandida y (d) perlita expandida.....	72
Figura 18:	Proceso de fabricación del Poliestireno Expandido.	77
Figura 19:	Proceso de producción del Poliestireno Expandido.	78
Figura 20:	Perlas de poliestireno expandido.....	78
Figura 21:	Modo de falla de un concreto normal (a) y un concreto con EPS (b).....	81
Figura 22:	Cambio de Densidad de EPS reciclado a diferentes temperaturas en horno durante 15 minutos.....	83
Figura 23:	Cambio de Volumen de EPS reciclado a diferentes temperaturas en horno durante 15 minutos.....	84
Figura 24:	Esquema de flujo de procesos de la RNA en el pronóstico de la resistencia a la compresión.	88



Figura 25: Esquema de flujo de procesos de la RNA en el pronóstico de la trabajabilidad (slump).	89
Figura 26: Ubicación de laboratorio LAIA CONSUL.	90
Figura 27: Ubicación de la cantera.	105
Figura 28: Obtención del agregado fino.	105
Figura 29: <i>Ubicación de la cantera – piedra chancada.</i>	107
Figura 30: Obtención piedra chancada.	107
Figura 31: Cuarteo del Material Fino.	110
Figura 32: Cuarteo del Material Grueso.	111
Figura 33: Muestras para contenido de humedad en conglomerados finos y grueso.	112
Figura 34: Análisis granulométrico agregado fino.	115
Figura 35: Análisis granulométrico agregado grueso.	115
Figura 36: Obtención del estado SSS del agrega del agregado fino.	121
Figura 37: <i>Procedimiento para la determinación del peso específico del agregado fino.</i>	122
Figura 38: Obtención del estado SSS del agrega del agregado grueso.	124
Figura 39: <i>Procedimiento para la determinación del peso específico del agregado grueso.</i>	125
Figura 40: Colocado de muestra en molde para ensayo de PUSS agregado fino.	127
Figura 41: Colocado de muestra en molde para ensayo de PUSS agregado grueso.	128
Figura 42: Llenado de muestra en molde para ensayo PUCS agregado fino.	129
Figura 43: Colocado de muestra en molde para ensayo de PUCS agregado grueso.	129
Figura 44: Esferas de poliestireno expandido modificado EPS.	132
Figura 45: Esferas de poliestireno expandido EPS en el horno antes de la exposición a temperatura.	133
Figura 46: Esferas de poliestireno expandido EPS en el horno luego de la exposición a temperatura.	133
Figura 47: Análisis granulométrico de las esferas de poliestireno expandido modificado MEPS.	135
Figura 48: Proceso de toma de datos para el cálculo de la densidad de los MEPS.	141
Figura 49: Pesado de los materiales del concreto normal con sustitución de esferas de poliestireno expandido modificado MEPS.	180
Figura 50: Proceso de elaboración del concreto normal con sustitución de esferas de poliestireno expandido modificado MEPS.	181



Figura 51: Elaboración de probetas de concreto.	182
Figura 52: Poza de curado de probetas de concreto.	183
Figura 53: Poza de curado de probetas de concreto.	184
Figura 54: Asentamiento del concreto normal.	185
Figura 55: Asentamiento del concreto en sustitución de MEPS (130°C) 15%.	186
Figura 56: Ensayo a la compresión del concreto.	187
Figura 57: Secado de la muestra en el horno.	189
Figura 58: Saturado de la muestra por un periodo de 48 horas.	189
Figura 59: Secado superficial de la muestra húmeda.	190
Figura 60: Saturado y ebullición de muestra.	191
Figura 61: Sumergido de la muestra en canastilla suspendida.	191
Figura 62: Esquema de red neuronal empleada para la resistencia a compresión.	202
Figura 63: Esquema de red neuronal empleada para la trabajabilidad.	222
Figura 64: Curva granulométrica del agregado fino.	237
Figura 65: Curva granulométrica del agregado grueso.	238
Figura 66: Clasificación requerida para Agregado Grueso.	239
Figura 67: Curva granulométrica MEPS 110°C.	244
Figura 68: Curva granulométrica MEPS 130°C.	245
Figura 69: Curva granulométrica MEPS 145°C.	246
Figura 70: Gráfico número de neuronas vs error cuadrático medio MSE, modelo RNA_FC_A.	269
Figura 71: Modelo de RNA_FC_A con 4 neuronas en la capa oculta.	270
Figura 72: Performance del modelo de RNA_FC_A con 4 neuronas en la capa oculta.	271
Figura 73: Histograma del error en el modelo de RNA_FC_A con 4 neuronas en la capa oculta.	272
Figura 74: Gráfico número de neuronas vs error cuadrático medio MSE, modelo RNA_FC_B.	274
Figura 75: Modelo de RNA_FC_B con 12 neuronas en la capa oculta.	275
Figura 76: Performance del modelo de RNA_FC_B con 12 neuronas en la capa oculta.	276
Figura 77: Histograma del error en el modelo de RNA_FC_B con 12 neuronas en la capa oculta.	277



Figura 78: Gráfico número de neuronas vs error cuadrático medio MSE, modelo RNA_FC_C.....	279
Figura 79: Modelo de RNA_FC_C con 4 neuronas en la capa oculta.	280
Figura 80: Performance del modelo de RNA_FC_C con 4 neuronas en la capa oculta.	281
Figura 81: Histograma del error en el modelo de RNA_FC_C con 4 neuronas en la capa oculta.....	282
Figura 82: Gráfico número de neuronas vs error cuadrático medio MSE, modelo RNA_FC_D.	284
Figura 83: Modelo de RNA_FC_D con 8 neuronas en la capa oculta.	285
Figura 84: Performance del modelo de RNA_FC_D con 8 neuronas en la capa oculta.	286
Figura 85: Histograma del error en el modelo de RNA_FC_D con 8 neuronas en la capa oculta.....	287
Figura 86: Gráfico número de neuronas vs error cuadrático medio MSE, modelo RNA_S_A.....	290
Figura 87: Modelo de RNA_S_A con 16 neuronas en la capa oculta.....	291
Figura 88: Performance del modelo de RNA_S_A con 16 neuronas en la capa oculta.	292
Figura 89: Histograma del error en el modelo de RNA_S_A con 16 neuronas en la capa oculta.....	293
Figura 90: Gráfico número de neuronas vs error cuadrático medio MSE, modelo RNA_S_B.	295
Figura 91: Modelo de RNA_S_B con 8 neuronas en la capa oculta.	296
Figura 92: Performance del modelo de RNA_S_B con 8 neuronas en la capa oculta.	297
Figura 93: Histograma del error en el modelo de RNA_S_B con 8 neuronas en la capa oculta.....	298
Figura 94: Gráfico número de neuronas vs error cuadrático medio MSE, modelo RNA_S_C.	300
Figura 95: Modelo de RNA_S_C con 4 neuronas en la capa oculta.	301
Figura 96: Performance del modelo de RNA_S_C con 4 neuronas en la capa oculta.	302



Figura 97: Histograma del error en el modelo de RNA_S_C con 4 neuronas en la capa oculta.....	303
Figura 98: Capacidad de predicción para cada uno de los modelos de RNA para predicción de la resistencia a compresión.....	323
Figura 99: Capacidad de predicción para cada uno de los modelos de RNA para predicción de la trabajabilidad del concreto SLUMP.....	324



INDICE DE TABLAS

Tabla 1:	Matriz de consistencia.....	36
Tabla 2:	Requisitos Granulométricos de Agregado Grueso.....	69
Tabla 3:	Requisito granulométrico de agregado fino.....	69
Tabla 4:	Requisitos de los límites permisibles del agua para concreto.....	70
Tabla 5:	Rango de variación de pesos volumétricos para distintos tipos de concretos ligeros.....	73
Tabla 6:	Rangos de resistencia a compresión para concretos ligeros.	74
Tabla 7:	Diferencias entre propiedades de los concretos ligeros con y sin EPS.....	79
Tabla 8:	Ventajas y desventajas del concreto con EPS.....	80
Tabla 9:	Tabla comparativa de propiedades entre EPS Y MEPS.	85
Tabla 10:	Localización de instalaciones LAIA CONSUL.....	90
Tabla 11:	Numero de muestras en el ensayo de revenimiento del concreto con sustitución por MEPS.	93
Tabla 12:	Numero de briquetas fabricadas respecto a los métodos elaborados mencionados, para las mezclas diseñadas planteadas, temperatura y porcentaje de adicción de MEPS.	94
Tabla 13:	Cantidad de probetas cilíndricas de concreto con esferas de poliestireno expandido modificado MEPS para ensayo a la compresión.....	96
Tabla 14:	Numero de probetas cilíndricas de concreto con esferas de poliestireno expandido modificado MEPS para ensayo de densidad, absorción y vacíos.	98
Tabla 15:	Ubicación de Cantera.....	104
Tabla 16:	Ubicación de la cantera – piedra chancada.....	106
Tabla 17:	Peso mínimo de muestra.....	108
Tabla 18:	Recolección de datos del contenido de humedad agregado fino.	113
Tabla 19:	Recolección de datos del contenido de humedad agregado Grueso.	113
Tabla 20:	Recolección de datos de análisis granulométrico agregado fino.	116
Tabla 21:	Recolección de datos de análisis granulométrico agregado grueso.	116
Tabla 22:	Recolección de datos de porcentaje de retenidos acumulados por cada malla agregado fino.	118



Tabla 23: Recolección de datos de porcentaje de retenidos acumulados por cada malla agregado grueso.	118
Tabla 24: Registro de datos para gravedad específica y absorción.....	122
Tabla 25: Recolección de datos para gravedad específica y absorción.....	125
Tabla 26: Recolección de datos de peso unitario suelto agregado fino.	130
Tabla 27: Recolección de datos de peso unitario compactado agregado fino.....	130
Tabla 28: Recolección de datos de peso unitario suelto agregado grueso.	131
Tabla 29: Recolección de datos de peso unitario compactado agregado fino.....	131
Tabla 30: Recolección de datos de análisis granulométrico MEPS Temperatura 110°C.	135
Tabla 31: Recolección de datos de análisis granulométrico MEPS Temperatura 130°C.	136
Tabla 32: Recolección de datos de análisis granulométrico MEPS Temperatura 145°C.	136
Tabla 33: Recolección de datos de porcentaje de retenidos acumulados por cada malla MEPS Temperatura 110°C.	137
Tabla 34: Recolección de datos de porcentaje de retenidos acumulados por cada malla MEPS Temperatura 130°C.	138
Tabla 35: Recolección de datos de porcentaje de retenidos acumulados por cada malla MEPS Temperatura 145°C.	139
Tabla 36: Recolección de datos de densidad de esferas de poliestireno expandido modificado MEPS para una temperatura de 110°C.	142
Tabla 37: Recolección de datos de densidad de esferas de poliestireno expandido modificado MEPS para una temperatura de 130°C.	142
Tabla 38: Recolección de datos de densidad de esferas de poliestireno expandido modificado MEPS para una temperatura de 145°C.	143
Tabla 39: Propiedades de los agregados.	145
Tabla 40: Resistencia del concreto a la compresión promedio requerida.	145
Tabla 41: Para Concretos bombeables.	146
Tabla 42: Volumen unitario de agua para el tamaño nominal máximo y los valores de asentamiento.	147
Tabla 43: Porcentaje de aire atrapado para diferentes valores de Tamaño Máximo Nominal.....	147
Tabla 44: Relación agua-cemento por resistencia.....	148



Tabla 45: Volumen de Agregado Grueso por Unidad de Volumen de Concreto.	149
Tabla 46: Resistencia del concreto a la compresión promedio requerida.....	154
Tabla 47: Para Concretos bombeables.	155
Tabla 48: Volumen unitario de agua para el tamaño nominal máximo y los valores de asentamiento.	155
Tabla 49: Porcentaje de aire atrapado para diferentes valores de Tamaño Máximo Nominal.....	156
Tabla 50: Relación agua-cemento por resistencia.....	156
Tabla 51: Módulo de fineza de la combinación de agregados.	159
Tabla 52: Resistencia del concreto a la compresión promedio requerida.....	162
Tabla 53: Para Concretos bombeables.	163
Tabla 54: Requerimientos aproximados de agua de mezclado para diferentes valores de asentamiento y tamaños máximos de agregados.	164
Tabla 55: Porcentaje de aire atrapado para diferentes valores de tamaño máximo nominal.	164
Tabla 56: Relación agua-cemento por resistencia.....	165
Tabla 57: Porcentaje del agregado fino (tablas Walker).....	168
Tabla 58: Proporción en peso de la cantidad de concreto en sustitución de MEPS a temperatura de 110°C para el método ACI 211.....	172
Tabla 59: Proporción en peso de la cantidad de concreto en sustitución de MEPS a temperatura de 110°C para el método MF.....	173
Tabla 60: Proporción en peso de la cantidad de concreto en sustitución de MEPS a temperatura de 110°C para el método WALKER.....	173
Tabla 61: Proporción en peso de la cantidad de concreto en sustitución de MEPS a temperatura de 130°C para el método ACI 211.....	174
Tabla 62: Proporción en peso de la cantidad de concreto en sustitución de MEPS a temperatura de 130°C para el método Modulo de fineza de la combinación de agregados.	175
Tabla 63: Proporción en peso de la cantidad de concreto en sustitución de MEPS a temperatura de 145°C para el método WALKER.....	175
Tabla 64: Proporción en peso de la cantidad de concreto en sustitución de MEPS a temperatura de 145°C para el método ACI 211.....	176



Tabla 65: Proporción en peso de la cantidad de concreto en sustitución de MEPS a temperatura de 145°C para el método Modulo de fineza de la combinación de agregados.	177
Tabla 66: Proporción en peso de la cantidad de concreto en sustitución de MEPS a temperatura de 145°C para el método WALKER.....	177
Tabla 67: Datos para cálculo de densidad, absorción y volumen de vacíos del concreto método ACI-211 con adición de MEPS.....	192
Tabla 68: Datos para cálculo de densidad, absorción y volumen de vacíos del concreto método módulo de fineza de la combinación de los agregados con adición de MEPS.	194
Tabla 69: Datos para cálculo de densidad, absorción y volumen de vacíos del concreto método WALKER con adición de MEPS.....	195
Tabla 70: Distribución de los registros de la data para la elaboración y probar los modelos de RNA para predecir la resistencia a la compresión del concreto.	199
Tabla 71: Selección de las variables utilizadas para la predicción de la resistencia a la compresión del concreto utilizando Redes Neuronales Artificiales.	200
Tabla 72: Planteamientos de variables de entrada y salida para RNA para predicción de resistencia a compresión del concreto.....	203
Tabla 73: Numero de neuronas en las capas ocultas para cada una de las redes neuronales.	204
Tabla 74: Características principales para el entrenamiento de RNA para predicción de la resistencia a la compresión del concreto.....	205
Tabla 75: Distribución de los registros de la data para la elaboración y probar los modelos de RNA para predecir la trabajabilidad del concreto.	219
Tabla 76: Selección de las variables utilizadas para la predicción de la trabajabilidad del concreto utilizando Redes Neuronales Artificiales.....	220
Tabla 77: Planteamientos de variables de entrada y salida para RNA para predicción de trabajabilidad del concreto.....	223
Tabla 78: Numero de neuronas en las capas ocultas para cada una de las redes neuronales.	224
Tabla 79: Características principales para el entrenamiento de RNA para predicción de trabajabilidad del concreto.....	224
Tabla 80: Resultados de contenido de humedad agregado fino.....	236



Tabla 81: Resultados de contenido de humedad agregado grueso.....	236
Tabla 82: Ensayo de granulometría del agregado fino, Cantera Cutimbo.	237
Tabla 83: Ensayo de granulometría del agregado grueso, piedra chancada de cantera de producción de agregados de Cabanillas.....	238
Tabla 84: Módulo de fineza del Agregado Fino – Cantera Cutimbo.....	239
Tabla 85: Módulo de fineza del Agregado Grueso – piedra chancada de Cabanillas.	240
Tabla 86 Resultados de gravedad específica y absorción agregado fino.....	240
Tabla 87: Resultados de gravedad específica y absorción agregado fino.....	241
Tabla 88: Resultado de peso unitario suelto agregado fino.	242
Tabla 89: Resultado de peso unitario compactado agregado fino.....	242
Tabla 90: Resultado de peso unitario suelto agregado grueso.	243
Tabla 91: Resultado de peso unitario compactado agregado grueso.	243
Tabla 92: Ensayo de granulometría MEPS 110°C.....	244
Tabla 93: Ensayo de granulometría MEPS 130°C.....	245
Tabla 94: Ensayo de granulometría MEPS 145°C.....	246
Tabla 95: Resultados del diámetro promedio de los MEPS.....	247
Tabla 96: Ensayo densidad MEPS 110°C.....	248
Tabla 97: Ensayo densidad MEPS 130°C.....	249
Tabla 98: Ensayo densidad MEPS 145°C.....	249
Tabla 99: Ensayo en estado fresco trabajabilidad el concreto SLUMP para el método de diseño ACI con sustitución por MEPS.	250
Tabla 100: Ensayo en estado fresco trabajabilidad el concreto SLUMP para el método de diseño Modulo de Fineza con MEPS con sustitución por MEPS.	251
Tabla 101: Ensayo en estado fresco trabajabilidad el concreto SLUMP para el método de diseño walker con sustitución por MEPS.....	252
Tabla 102: Resistencia a la compresión de $f'c=210$ kg/cm ² , método de diseño ACI con MEPS, a/c=0.56.	253
Tabla 103: Resistencia a la compresión de $f'c=210$ kg/cm ² , método de diseño Modulo de Fineza de la combinación de agregados con MEPS, a/c=0.56.....	256
Tabla 104: Resistencia a la compresión de $f'c=210$ kg/cm ² , método de diseño Walker con MEPS, a/c=0.56.....	259
Tabla 105: Resultados del cálculo de densidad, absorción y volumen de vacíos del concreto método ACI-211 con adición de MEPS.....	262



Tabla 106: Resultados del cálculo de densidad, absorción y volumen de vacíos del concreto método módulo de fineza de la combinación de los agregados por sustitución de MEPS.	264
Tabla 107: Resultados del cálculo de densidad, absorción y volumen de vacíos del concreto método WALKER por sustitución de MEPS.	266
Tabla 108: Resultado del cálculo del MSE correspondiente al número de neuronas para el modelo RNA_FC_A.	268
Tabla 109: Pesos W1 respecto a 16 variables de entrada y 4 neuronas en la capa oculta.	272
Tabla 110: Pesos W2 respecto a las 4 neuronas en la capa oculta y la variable de salida.	273
Tabla 111: Resultado del cálculo del MSE correspondiente al número de neuronas para el modelo RNA_FC_B.	273
Tabla 112: Pesos W1 respecto a 13 variables de entrada y 12 neuronas en la capa oculta.	278
Tabla 113: Pesos W2 respecto a las 12 neuronas en la capa oculta y la variable de salida.	278
Tabla 114: Resultado del cálculo del MSE correspondiente al número de neuronas para el modelo RNA_FC_C.	279
Tabla 115: Pesos W1 respecto a 10 variables de entrada y 4 neuronas en la capa oculta.	282
Tabla 116: Pesos W2 respecto a las 4 neuronas en la capa oculta y la variable de salida.	283
Tabla 117: Resultado del cálculo del MSE correspondiente al número de neuronas para el modelo RNA_FC_D.	283
Tabla 118: Pesos W1 respecto a 8 variables de entrada y 8 neuronas en la capa oculta.	288
Tabla 119: Pesos W2 respecto a las 8 neuronas en la capa oculta y la variable de salida.	288
Tabla 120: Resultado del cálculo del MSE correspondiente al número de neuronas para el modelo RNA_S_A.	289
Tabla 121: Pesos W1 respecto a 12 variables de entrada con 16 neuronas en la capa oculta.	294



Tabla 122: Pesos W2 respecto a las 16 neuronas en la capa oculta y la variable de salida.	294
Tabla 123: Resultado del cálculo del MSE correspondiente al número de neuronas para el modelo RNA_S_B.....	295
Tabla 124: Pesos W1 respecto a 9 variables de entrada con 8 neuronas en la capa oculta.	298
Tabla 125: Pesos W2 respecto a las 8 neuronas en la capa oculta y la variable de salida.	299
Tabla 126: Resultado del cálculo del MSE correspondiente al número de neuronas para el modelo RNA_S_C.....	299
Tabla 127: Pesos W1 respecto a 6 variables de entrada con 4 neuronas en la capa oculta.	303
Tabla 128: Pesos W2 respecto a las 4 neuronas en la capa oculta y la variable de salida.	304
Tabla 129: Análisis de costos para ensayos de concreto-método redes neuronales artificiales.	305
Tabla 130: Análisis de tiempos.	306
Tabla 131: Análisis estadístico para cálculo del coeficiente de determinación y coeficiente de correlación para un modelo RNA_FC_A con 4 neuronas en la capa oculta.....	308
Tabla 132: Análisis estadístico para cálculo del coeficiente de determinación y coeficiente de correlación para un modelo RNA_FC_B con 12 neuronas en la capa oculta.....	310
Tabla 133: Análisis estadístico para cálculo del coeficiente de determinación y coeficiente de correlación para un modelo RNA_FC_C con 4 neuronas en la capa oculta.....	312
Tabla 134: Análisis estadístico para cálculo del coeficiente de determinación y coeficiente de correlación para un modelo RNA_FC_D con 8 neuronas en la capa oculta.....	314
Tabla 135: Resumen de análisis estadístico para cálculo del coeficiente de determinación y coeficiente de correlación de los modelos de RNA.	316
Tabla 136: Análisis estadístico para cálculo del coeficiente de determinación y coeficiente de correlación para un modelo RNA_S_A con 16 neuronas.	317



Tabla 137: Análisis estadístico para cálculo del coeficiente de determinación y coeficiente de correlación para un modelo RNA_S_B con 8 neuronas. ..	318
Tabla 138: Análisis estadístico para cálculo del coeficiente de determinación y coeficiente de correlación para un modelo RNA_S_C con 4 neuronas. ..	320
Tabla 139: Resumen de análisis estadístico para cálculo del coeficiente de determinación y coeficiente de correlación de los modelos de RNA.	321
Tabla 140: Resistencia a compresión real y predicciones obtenidas mediante modelos de RNA utilizados para la prueba ANOVA.	325
Tabla 141: Información del factor	326
Tabla 142: Medias, desviación estándar e intervalos de confianza del 95% para cada factor.....	326
Tabla 143: Análisis de varianza	327
Tabla 144: Trabajabilidad real y predicciones obtenidas mediante modelos de RNA utilizados para la prueba ANOVA.	328
Tabla 145: Información del factor	329
Tabla 146. Medias, desviación estándar e intervalos de confianza del 95% para cada factor.....	329
Tabla 147: Análisis de varianza.	329



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

ASTM	: American Society of Testing Materials, que significa, Asociación Americana de Ensayo de Materiales.
NTP	: Norma Técnica Peruana.
ACI	: Instituto Americano del Concreto.
RNA	: Red Neuronal Artificial.
EPS	: Esferas de poliestireno expandido.
MEPS	: Esferas de poliestireno expandido modificado.
F'c	: Resistencia a la compresión, kg/cm ²
W%	: Contenido de humedad.
W _s	: Peso seco de la muestra.
°C	: Grados centígrados.
MF	: Módulo de fineza del agregado fino.
MG	: Módulo de fineza agregado grueso.
SSS	: Estado saturado superficialmente seco.
Ge _a	: peso específico aparente.
Ge _{sss}	: Peso específico aparente superficialmente seco.
Walker	: Método diseño Walker.
a/c	: Relación agua/cemento.
g	: Gramos.
Kg	: Kilogramos.
PUCS	: Peso unitario compactado seco
PUSS	: Peso unitario suelto seco.
EMSE	: Error cuadrático medio.
W _{ij}	: Peso correspondiente de la neurona i hacia la neurona j



W_{jk}	: Peso correspondiente de la neurona j hacia la neurona k
R^2	: Coeficiente de determinación.
\hat{y}	: Variable dependiente estimada
\bar{y}	: Promedio de la variable dependiente
y	: Variable dependiente
E_s	: Empuje del sistema.
V_s	: Volumen del sistema.
E_{S_MEPS}	: Empuje del sistema con MEPS.
V_{S_MEPS}	: Volumen del sistema con MEPS.
V_{MEPS}	: Volumen de MEPS.
ρ_{MEPS}	: Densidad de los MEPS.
FC	: Factor cemento
CN	: Concreto normal.



RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo principal evaluar la eficacia de las redes neuronales artificiales RNA en la predicción de la resistencia a la compresión y trabajabilidad del concreto ligero con esferas de poliestireno expandido modificado (MEPS). Para ello se utilizó un método experimental el cual consiste en la obtención de los resultados de los ensayos físicos de los agregados para la elaboración de diseños de mezcla. Se elaboro 3 diseños de mezclas de concreto los cuales se sustituyeron por un metro cubico del volumen de concreto en porcentajes del 5%, 15% y 30% con esferas de poliestireno expandido modificado MEPS a temperaturas de 110°C, 130°C y 145°C. Esto sirvió para dosificar y elaborar probetas de concreto obteniendo valores de resistencia a compresión y trabajabilidad. Luego utilizando el lenguaje de programación Matlab con su caja de herramientas (Neural Network Toolbox) se elaboraron modelos de redes neuronales para la predicción de la resistencia a compresión y trabajabilidad del concreto con una arquitectura perceptrón multicapa con una conexión hacia adelante (feedforward) utilizando una función de entrenamiento backpropagation. Definida la arquitectura los modelos pasaron por las siguientes fases de entrenamiento, validación y test. Para seleccionar la mejor arquitectura para cada uno de los modelos se utilizó el error cuadrático medio MSE, luego se probó la efectividad de cada modelo de red neuronal utilizando el coeficiente de determinación R^2 obteniendo una capacidad predictiva para el modelo de resistencia a la compresión R^2 superior a 90% mientras que para el modelo de trabajabilidad obtuvo una capacidad predictiva del 70%.

Palabras claves: Red neuronal artificial, esferas de poliestireno expandido modificado, concreto ligero, resistencia a compresión, trabajabilidad del concreto.



ABSTRACT

The purpose of this research is to evaluate the effectiveness of ANN artificial neural networks in the prediction of compressive strength and workability of lightweight concrete with modified expanded polystyrene spheres (MEPS). For this purpose, an experimental method was used, which consists of obtaining the results of the physical tests of the aggregates for the elaboration of mix designs. Three concrete mix designs were elaborated, which were substituted by one cubic meter of concrete volume in percentages of 5%, 15% and 30% with MEPS modified expanded polystyrene spheres at temperatures of 110°C, 130°C and 145°C. This was used to dose and prepare concrete specimens, obtaining compressive strength and workability values. Then, using the Matlab programming language with its Neural Network Toolbox, neural network models for the prediction of compressive strength and workability of concrete were elaborated with a multilayer perceptron architecture with a feedforward connection using a backpropagation training function. Once the architecture was defined, the models went through the following phases of training, validation and testing. To select the best architecture for each of the models, the mean square error MSE was used, then the effectiveness of each neural network model was tested using the coefficient of determination R^2 , obtaining a predictive capacity for the compressive strength model R^2 higher than 90% while for the workability model it obtained a predictive capacity of 70%.

Keywords: Artificial neural network, modified expanded polystyrene spheres, lightweight concrete, compressive strength, workability of concrete.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1.1 Contextualización

A través del paso de los años es que se viene dando un crecimiento tecnológico y en particular en el área de la ingeniería civil al campo computacional, es así que se vienen desarrollando diferentes metodologías de aprendizaje profundo como es la inteligencia artificial siendo el caso las redes neuronales artificiales que a su vez reúne una serie de técnicas informáticas para realizar funciones de aprendizaje y autocorrección mediante algoritmos o códigos de programación computacional para resolver diversos problemas, en este caso se desarrollan y analizan diferentes redes para encontrar una tipología óptima que predisca las propiedades del concreto ligero.

Por tales motivos se desarrolló una red neuronal óptima para la predicción de la resistencia a la compresión y trabajabilidad del concreto ligero adicionando esferas de poliestireno expandido modificado MEPS por sus diferentes propiedades y su respectivo análisis sirviendo de aporte para futuros proyectos.

1.1.2 Descripción del problema

Los métodos tradicionales de diseño de mezclas de concreto tienen algunas deficiencias, que costarán dinero, tiempo y energía, porque estos procedimientos son puramente empíricos, basados en la generalización de la experiencia existente, como tablas o fórmulas empíricas, debido a la incertidumbre de la composición del hormigón, como áridos finos y gruesos, materiales cementosos y aditivos químicos.

El gasto de dinero y energía se refleja en el desperdicio de materiales. Producido a través de un proceso de prueba y error (tanteos sucesivos empleando una aproximación



de cualquier método de diseño). Como ejemplo podemos tomar, los costos de tiempo que se pueden ver en algunas pruebas de laboratorio, y que generalmente toman una cantidad considerable de tiempo para completarse. Por ejemplo, para la prueba de compresión a los 7,14 y 28 días.

Cabe mencionar que el desperdicio anteriormente mencionado es más obvio en concretos con características especiales (ejemplo: concreto ligero meps), porque normalmente se requiere una gran cantidad de muestras, para expresar sus principales características, como la resistencia a compresión, trabajabilidad, módulo de elasticidad, etc.

A su vez, es usualmente difícil proveer un modelo exacto que proporcione predicciones aceptables sobre la trabajabilidad de cualquier tipo de concreto en general (para este caso concreto ligero MEPS) esto debido a una amplia variación en la composición química y características físicas de los materiales de concreto.

Por esto es que, para tratar de minimizar el número de muestras y el tiempo a emplear, los modelos matemáticos son comúnmente empleados, sin embargo, cuando estos poseen muchas variables independientes, los métodos tradicionales de regresión pierden precisión, siendo el concreto un material no lineal, por lo que modelar su comportamiento no es una tarea fácil, y es por eso que el uso de la inteligencia artificial y el uso de redes neuronales artificiales juegan un rol importante.

1.1.3 Formulación del problema

¿Cuál es eficacia de las redes neuronales artificiales en la predicción de la resistencia a la compresión y trabajabilidad del concreto ligero con esferas de poliestireno expandido modificado (MEPS)?



1.1.4 Problemas específicos

- ¿Es posible desarrollar un modelo de red neuronal artificial para predecir la resistencia a la compresión del concreto ligero con poliestireno expandido modificado (MEPS)?
- ¿Es posible desarrollar un modelo de red neuronal artificial para predecir la trabajabilidad del concreto ligero con poliestireno expandido modificado (MEPS)?
- ¿Cuál es la arquitectura de red neuronal artificial más eficaz para la predicción de la resistencia a compresión y trabajabilidad en concreto ligero con poliestireno expandido modificado (MEPS)?
- ¿Es posible reducir tiempos y costos en la obtención de la resistencia a la compresión del concreto ligero MEPS en comparación a los métodos tradicionales?

1.2 HIPÓTESIS

1.2.1 Hipótesis general

La red neuronal artificial es eficaz en la predicción de la resistencia a la compresión y trabajabilidad del concreto ligero con esferas de poliestireno expandido modificado (MEPS).

1.2.2 Hipótesis específica

- El modelo de red neuronal artificial permite predecir la resistencia a la compresión del concreto ligero con esferas de poliestireno expandido modificado (MEPS).
- El modelo de red neuronal artificial permite predecir la trabajabilidad del concreto ligero con esferas de poliestireno expandido modificado (MEPS).
- La arquitectura más eficaz es la multicapa con tipología feedforward que utiliza un aprendizaje backpropagation prediciendo la resistencia a la compresión y



trabajabilidad del concreto con poliestireno expandido modificado (MEPS) de una manera más precisa y con alta confiabilidad.

- Las redes neuronales artificiales reducen considerablemente los costos y tiempos en la predicción de la resistencia a la compresión del concreto ligero MEPS en comparación de los métodos tradicionales.

1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Con el presente proyecto de investigación se busca ampliar el campo de la ingeniería civil al campo computacional utilizando la inteligencia artificial a través de las redes neuronales artificiales para predecir las propiedades del concreto ligero con esferas de poliestireno expandido modificado (MEPS).

El estudio se justifica por la dificultad en la elaboración del concreto ligero, la obtención de sus propiedades y la no existencia de normativa ni dosificaciones para este tipo de concreto en el Perú. Además, este tipo de concreto podría presentar grandes ventajas por su bajo peso específico como también por sus excelentes propiedades térmicas y acústicas.

Por la complejidad presente en este tipo de concretos, la mejor herramienta son las redes neuronales artificiales las cuales utilizan los parámetros de fabricación que influyen directamente en las propiedades del concreto asegurando una predicción óptima y de alta confiabilidad, obteniendo resultados en un menor tiempo y reduciendo costos respecto a los métodos tradicionales que obtienen dichos valores una vez alcanzado el periodo de curado a los 28 días.



1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general

Evaluar la eficacia de las redes neuronales artificiales en la predicción de la resistencia y trabajabilidad del concreto ligero con poliestireno expandido modificado (MEPS).

1.4.2 Objetivo específico

- Desarrollar un modelo de red neuronal artificial para predecir la resistencia a la compresión del concreto ligero con esferas de poliestireno expandido modificado (MEPS).
- Desarrollar un modelo de red neuronal artificial para predecir la trabajabilidad del concreto ligero con esferas de poliestireno expandido modificado (MEPS).
- Establecer la arquitectura de red neuronal artificial más eficaz para la predicción de la resistencia a compresión y trabajabilidad en concreto ligero con poliestireno expandido modificado (MEPS).
- Reducir costos y tiempos en la obtención de la resistencia a la compresión del concreto ligero MEPS mediante el uso de redes neuronales artificiales en comparación a los métodos tradicionales.

1.5 VARIABLES

1.5.1 Definición conceptual de variables

Variable independiente: Redes Neuronales Artificiales

Variable dependiente : Resistencia a la compresión y trabajabilidad del concreto ligero.

Redes Neuronales Artificiales: Pilar de la inteligencia artificial, es un modelo de creación cuyo sistema se basa en el funcionamiento del cerebro humano. Están formadas



por diferentes nodos que funcionan como neuronas, y que transmiten señales e información entre sí.

1.5.2 Operacionalización de variables

La operacionalización de las variables define claramente la variable dependiente Independiente y la manera como se observará y medirá cada característica de estudio mostradas en la tabla 1.

1.6 MATRIZ DE CONSISTENCIA

1.6 MATRIZ DE CONSISTENCIA.

TABLA 1: Matriz de consistencia

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIÓN	Indicador	Unidad de medida	Factor a medir	Metodología
<p>Problema General: <u>Objetivo General</u> <u>Hipótesis General:</u> <u>Variable Dependiente (VI)</u></p>								
¿Cuál es eficacia de las redes neuronales artificiales en la predicción de la resistencia a compresión y trabajabilidad del concreto ligero con poliestireno expandido modificado (MEPS)?	Evaluar la eficacia de las redes neuronales artificiales en la predicción de la resistencia y trabajabilidad del concreto ligero con poliestireno expandido modificado (MEPS).	La red neuronal artificial es eficaz en la predicción de la resistencia a compresión y trabajabilidad del concreto ligero con esferas de poliestireno expandido.	Redes Neuronales Artificiales	Variables de entrada salida	Número de variables de entrada de salida	Unidades de las variables de entrada de salida	Parámetros de las variables de entrada de salida	Tipo de Investigación: Analítico Enfoque de Investigación: Cuantitativa Alcance o Niveles de la Investigación: Correlacional
<p>Problemas Específicos: <u>Objetivo Específico:</u> <u>Hipótesis Específica:</u> <u>Variable Dependiente (VD)</u></p>								
¿Es posible desarrollar un modelo de red neuronal artificial para predecir la resistencia a la compresión del concreto ligero con poliestireno expandido modificado (MEPS)?	Desarrollar un modelo de red neuronal artificial que permite predecir la resistencia a la compresión del concreto ligero con poliestireno expandido modificado (MEPS).	El modelo de red neuronal artificial permite predecir la resistencia a la compresión del concreto ligero con poliestireno expandido modificado (MEPS).	Resistencia a la compresión del concreto ligero MEPS	Resistencia a compresión	Ensayo de resistencia a compresión del concreto	Kg/cm2	Resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días	Diseño metodológico de la Investigación: Experimental Tiempo de estudio: Transseccionales o transversales

Continúa siguiente hoja.

<p>¿Cual es la arquitectura de red neuronal artificial mas eficaz para la prediccion de la resistencia a compresion y trabajabilidad en concreto ligero con poliestireno expandido modificado (MEPS)?</p>	<p>Establecer la arquitectura de red neuronal artificial más eficaz para la predicción de la resistencia a compresión y trabajabilidad del concreto ligero con poliestireno expandido modificado (MEPS).</p>	<p>La arquitectura más eficaz es la multicapa con topología feedforward que utiliza un aprendizaje backpropagation prediciendo la resistencia a la compresión y trabajabilidad del concreto con poliestireno expandido modificado (MEPS) de una manera más precisa y con alta confiabilidad.</p>	<p>Trabajabilidad del concreto ligero MEPS</p>	<p>Trabajabilidad del concreto ligero</p>	<p>Trabajabilidad del concreto ligero MEPS</p>	<p>Ensayo de cono de abrams</p>
<p>¿Es posible reducir tiempos y costos en la obtención de la resistencia a la compresión del concreto ligero MEPS en comparación a los métodos tradicionales?</p>	<p>Reducir tiempos y costos en la predicción de la resistencia a la compresión del concreto ligero MEPS en comparación a los métodos tradicionales.</p>	<p>Las redes neuronales artificiales reducen considerablemente los tiempos y costos en la predicción de la resistencia a la compresión del concreto ligero MEPS en comparación a los métodos tradicionales.</p>	<p>Trabajabilidad del concreto ligero</p>	<p>Trabajabilidad del concreto ligero</p>	<p>Trabajabilidad del concreto ligero MEPS</p>	<p>Ensayo de cono de abrams</p>

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo



CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN O MARCO REFERENCIAL

2.1.1 Antecedentes a Nivel Internacional

Silva & Zapata (2020), estudió la “Propuesta metodológica para predecir la resistencia a la compresión de un cilindro de concreto de acuerdo con la norma del sector de la construcción mediante el uso de las TIC”, creando una herramienta de pronóstico con la capacidad de informar cuáles serán los próximos valores que tomará la resistencia a la compresión de una muestra de cemento, se concluye que la herramienta de pronóstico es un sistema determinista, en el cual el valor futuro de la herramienta de pronóstico no involucra el azar, y se propone que mientras los valores de entrada sea el mismo se obtendrá el mismo resultado, o al menos muy similar. Esto demuestra un alto grado de confiabilidad, porque en la mayoría de los casos el valor obtenido será el mismo, si y solo si se utiliza el mismo valor de entrada.

Deepak et al. (2019), en su estudio “Modeling of concrete Slump and compressive strenght using ANN” concluyen que los modelos de redes neuronales son adecuados esto por los valores altos de R, además los valores de MSE son bastante pequeños indicando que los resultados son los más apropiados. Los resultados obtenidos confirman la predicción de los valores de resistencia a compresión y asentamiento de los morteros utilizando redes neuronales artificiales.

Gonzáles et al. (2017), estudió las “Redes neuronales artificiales para estimar propiedades en estado fresco y endurecido, para hormigones reforzados con fibras metálicas”, se logró elaborar un conjunto de códigos computacionales que usa la técnica de red neuronal artificial para su predicción de propiedades en estado fresco y endurecido



para hormigones que son reforzados con fibras metálicas, concluye que entre los valores obtenidos de las propiedades estimadas usando RNA y los valores de éstas reportadas en los conjuntos de entrenamiento hacen de la herramienta confiable para tal fin usando como indicador de correlación el factor de correlación lineal.

Acuña et al. (2014), estudió “Uso de las redes neuronales artificiales en el modelado del ensayo de resistencia a compresión de concreto de construcción según la norma ASTM C39/C 39M” en donde se introdujo una nueva técnica de modelado para solucionar el problema de obtener la resistencia a la compresión del hormigón después del período de curado, acortando enormemente el tiempo de obtención de resultados obteniendo el modelado de la red neuronal artificial del ensayo de resistencia a la compresión a partir de parámetros de fabricación con un coeficiente de correlación superior a 0,93. Los resultados obtenidos reflejan una gran similitud entre la red tipo perceptrón y la red tipo Elman. Sin embargo, la mayor simplicidad de la red tipo perceptrón y su menor tiempo de desarrollo la hace más adecuada para su uso en este problema concreto.

González et al. (2012), estudió “Exploración con redes neuronales artificiales para estimar la resistencia a la compresión, en concretos fibroreforzados con acero” concluye que : utilizando el error MSE como indicadores de rendimiento, se desarrolló y evaluó una red neuronal artificial con tipo feedforward, aprendizaje de retropropagación y arquitectura multicapa además de los factores de correlación R^2 para la fase de validación, por ende y de acuerdo a estos indicadores, la red tiene un buen comportamiento al realizar esta estimación, teniendo en cuenta las características de las variables de entrada siendo significativa una amplia consideración de estas para hacer de la RNA una herramienta apropiada de predicción universal de la resistencia a la compresión del concreto con fibras de acero.



2.1.2 Antecedentes a Nivel Nacional

Vega (2019), estudió el “Modelamiento computacional de la resistencia a compresión y trabajabilidad del concreto ligero con esferas de poliestireno expandido” utilizó porcentajes de EPS de 22,5% y 25% consiguiéndose mezclas de concreto con densidades entre 1700-1800 y resistencias a 28 días de 178-280. Concluyendo que: “El porcentaje en volumen de EPS en la mezcla es inferior al 30% para lograr una mezcla de hormigón con resistencia estructural ($f'c$ superior a 210 kg / m²) y que cuanto menor sea el tamaño de las partículas de EPS, mayor será la resistencia a la compresión que se puede obtener, pero también reduce la trabajabilidad de la mezcla. Además, que utilizando la red neuronal artificial BP y la máquina de soporte vectorial para obtener el modelo de predicción de la resistencia a la compresión y la trabajabilidad, la precisión es superior al 90%.

Gonzales (2018), estudio el Análisis de la resistencia del concreto mediante redes neuronales haciendo uso del agregado de la cantera Santa Rosa Huancavelica” se pudo diseñar una red neuronal adecuada a partir de las características y parámetros de producción del concreto, para predecir eficazmente la resistencia a la compresión axial alcanzada después del número especificado de días de curado.

Heredia & Pérez (2018), “Análisis y evaluación del concreto ligero como concreto estructural usando como adición controlada poliestireno expandido modificado (MEPS) aplicado a una losa unidireccional para fines habitacionales”, Concluye: a partir de los resultados obtenidos permite inferir que las losas unidireccionales de concreto ligero fabricadas en base a MEPS cumple con la norma E.060, por lo tanto puede considerarse una opción a tomar en cuenta en el ámbito de la construcción; pues este material nos aporta una serie de características positivas, considerando la tecnología, perspectivas económicas y ambientales, sumadas al concreto ordinario señalado en este trabajo.



Díaz (2017), estudió el “Uso de las Redes Neuronales Artificiales en el modelado del ensayo de resistencia a compresión de concreto de construcción según la norma ASTM c39/c 39m”. Concluye que la aplicabilidad del uso de Redes Neuronales Artificiales en el modelado de ensayo de resistencia a compresión del concreto, usando el software MATLAB, pronostica dicha resistencia con un alto grado de confianza; asimismo, la consideración de variables de entrada como son: la cantidad de cemento, agua, cantidades y propiedades de los agregados relaciones agua – cemento y de más, hacen de las Redes Neuronales una herramienta apropiada de predicción universal de la Resistencia a la Compresión del Concreto proponiendo cinco redes neuronales para luego ser evaluadas, usando como indicadores de desempeño el Error Cuadrático Medio (ECM) y el factor de correlación R^2 .

2.2 MARCO TEÓRICO

2.2.1 Inteligencia Artificial

Ponce (2010) la define como una derivación de la informática (ciencias computacionales) que se apropia de métodos simbólicos y no algorítmicos para resolver dificultades.

2.2.2 Redes Neuronales Artificiales (RNA)

2.2.2.1 Fundamentos biológicos

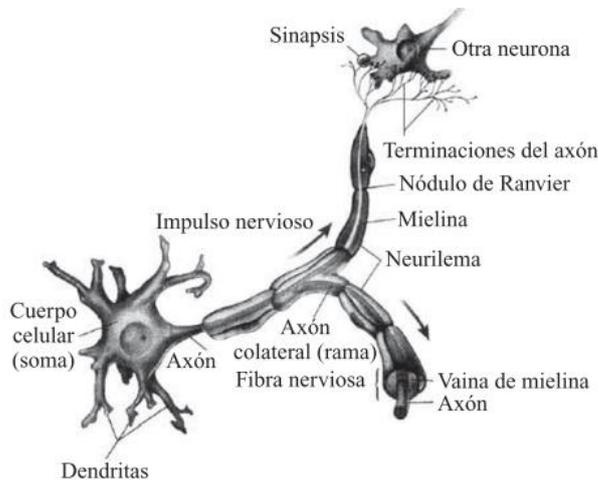
Una red neural artificial es un modelo computacional que imitan el funcionamiento de procesos de información biológica que tienen lugar en nuestro cerebro, que contienen una gran cantidad de neuronas biológicas interconectadas.

Se aprecia para la figura 1 una neurona orgánica que es una célula especializada en el procesamiento de la información, que consta de un cuerpo celular. Como característica de la neurona es su capacidad comunicativa, recibiendo señales el cuerpo

celular emitiendo señales de salida además de las dendritas. El axón es el encargado de transmitir estas señales, estas señales son de dos tipos químicas y eléctricas (Ponce, 2010).

Figura 1:

Neurona Biológica (Elementos Naturales).



Fuente: Ponce (2010)

Para establecer la similitud con las redes neurales artificiales se puede decir que las señales que llegan a la sinapsis vienen a ser las entradas de la neurona; éstas son ponderadas por un parámetro denominado peso, éstas señales de entrada llegan a excitar a la neurona (sinapsis con peso positivo) o inhibirla (peso negativo) (Ponce, 2010).

2.2.2.2 Neurona Artificial

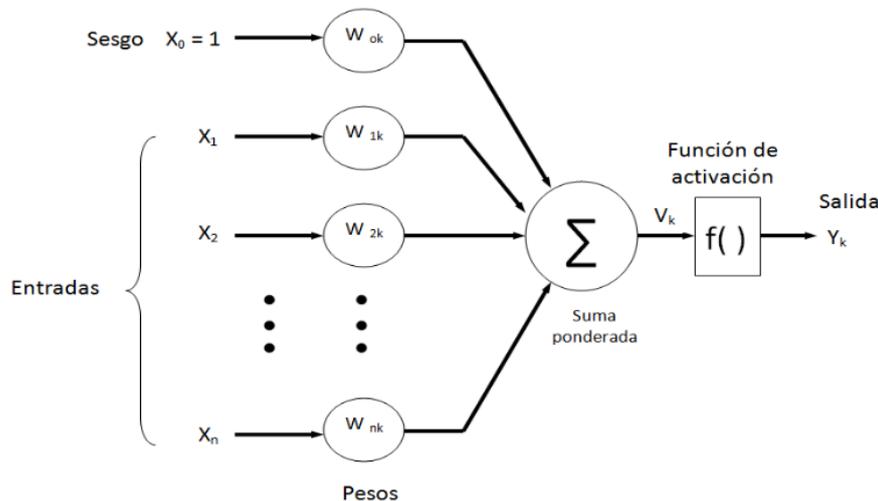
Una neurona artificial o nodo es una unidad de procesamiento de información, fundamental para la operación de una red neural (Haykin, 2005). Es posible identificar los siguientes elementos para esta unidad de procesamiento de información (neurona):

- **Nodos de entrada o entradas:** Acorde a la situación a analizar, son escalares que se proporcionan a la red neural.
- **Nodos de salida o salidas:** A efecto del aprendizaje, estas salidas, serán arrojadas por la red neural (valores).

- **Pesos sinápticos:** Estos representarán la importancia de las entradas, esto mediante valores numéricos.
- **Un punto de suma de entradas ponderadas:** Aquí se multiplica los respectivos pesos a la suma de las entradas realizada.
- **Función de activación:** Esta limitará la categoría para la respectiva salida de la unidad de procesamiento de información (neurona), función lineal o no lineal.
- **Sesgo:** Esto será igual a la unidad, y será confirmado por una entrada.

Figura 2:

Modelo de una neurona



Fuente: Haykin (2005)

Para la figura 2 podemos distinguir el modelo de un nodo o neurona, que en conjunto presentará (función de activación, entradas, salida, pesos).

Las neuronas, células o autómatas artificiales pueden cambiar su estado en función de sus entradas, además de la asociación de sus sinapsis y sus conexiones. Recibirá la denominación de nivel de activación, esto pretende mostrar que dicha red tiende y puede asumir variables estados de activación, esto ante nuevas entradas. El nivel de activación de las células depende de la entrada recibida y del valor de las conexiones sinápticas, pero no depende en el estado de activación anterior (Carrión, 2013).

Para determinar el nivel de activación (y) de una neurona, primero se debe calcular la entrada total a la unidad (célula), y luego este valor se evalúa mediante la función de transferencia (f), la entrada total de la neurona (Σ) es el valor ponderado suma de las entradas equivalentes multiplicadas por sus respectivas pesos sinápticos (ω) (Carrión, 2013) esto además puede ilustrarse en la figura 3.

La entrada total a la célula puede definirse por la **ecuación 1.1**:

$$\Sigma = x_1 * \omega_1 + x_2 * \omega_2 + x_3 * \omega_3 + \dots x_n * \omega_n \quad (1.1)$$

Y en forma vectorial:

$$\Sigma = X^T * \omega \quad (1.2)$$

En donde:

X^T = vector de entradas a la neurona

ω = vector de pesos sinápticos

Con lo cual se puede calcular la salida de la neurona **ecuación (1.3)** luego de aplicar a Σ una función de transferencia f .

$$y = f(\Sigma) \quad (1.3)$$

La función de activación o función de transferencia (f) produce la salida (y) de la neurona al evaluar el valor de Σ (Fig. 1), existen diferentes funciones de transferencia, dependiendo de cual función de transferencia ha de utilizar es que se define el modelo de neurona artificial a requerir (Carrión, 2013).

2.2.2.3 Definición de una red neuronal artificial

Una RNA se puede definir para aquellos métodos de mapeo que son de manera no lineal, cuya estructura se basa en principios que se presentan en humanos y animales. Presentan, en gran número, procesadores simples ligados por conexiones con pesos. Se sabe que sus unidades de procesamiento llamadas neuronas reciben entradas de otros

nodos generando una salida simple escalar que dependerá de la información disponible (Ponce, 2010).

Una RNA como se mencionó, podrá caracterizarse por los elementos detallados a continuación:

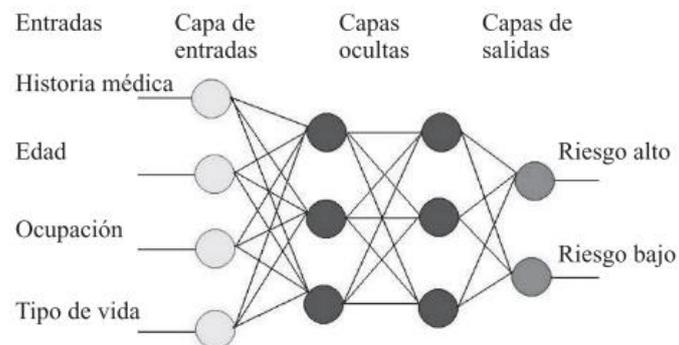
- a) Unidades de procesamiento (neuronas).
- b) Salida de la unidad, que como se vio en párrafos anteriores, equivaldría a un estado de activación para cada unidad.
- c) Los respectivos pesos, asignarán el efecto de entrada en la unidad. Estas serán las conexiones entre las unidades.

2.2.2.4 Elementos de una red neural

Una Red neural manifiesta de un acumulado de unidades de procesamiento conectados entre sí y en los que se enviarán información, esto se realiza a través de conexiones. En la siguiente figura se ilustra un bosquejo básico de una Red neural en la que se dará detalles, como las diferentes capas que tiene, que viene a ser un ordenado en estructura que se le conoce como feed-forward, esto por el flujo de información (hacia adelante).

Figura 3:

Esquema básico de una red.



Fuente: Ponce, 2010

En la figura 3 se muestra el esquema básico que nos muestra sus diferentes capas que son la capa de entrada, capa oculta y capas de salida.

Además, como elementos básicos de una RNA se tiene:

- Conjunto de unidades de procesamiento (neuronas).
- Conexiones entre unidades (asociado a cada conexión un peso o valor).
- Funciones de salida o activación para cada unidad de procesamiento.

2.2.2.5 Funcionamiento de una red neuronal artificial

Según (Hernández, 2006), el modo de operación de las neuronas es el siguiente:

- El conjunto de entradas que llegan a la neurona $\mathbf{j}(X_i)$, que se irán multiplicado por cada uno de los pesos (\mathbf{w}_{ij}), que va de manera asociada a las conexiones.
- Se realizará como se vio, la suma de esta ponderación de entradas con sus respectivos pesos, además del valor del sesgo de la neurona (\mathbf{b}_j).
- Una vez obtenida la suma ponderada, se obtendrá una salida que se dará al emplear una transferencia propia de la neurona (función de activación).

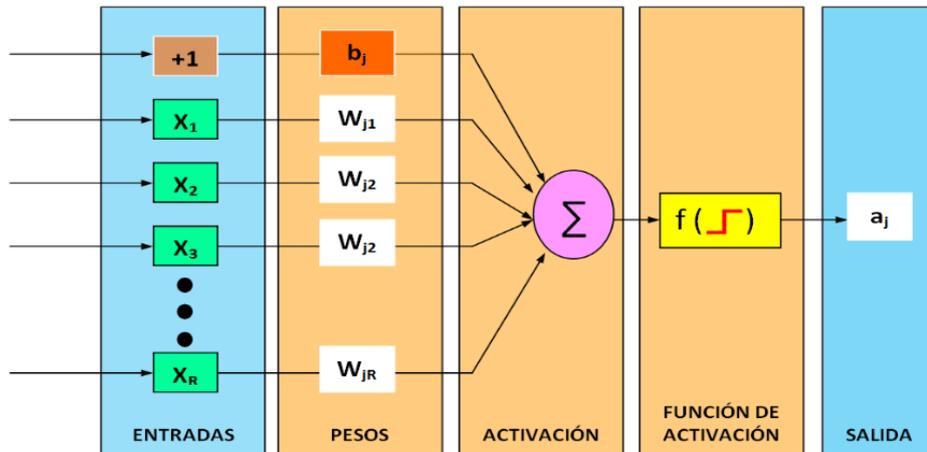
$$a_j = \int (W_{j1} \cdot X_1 + W_{j2} \cdot X_2 + W_{j3} \cdot X_3 + \dots + W_{jR} \cdot X_R + b_j)$$

$$a_j = \int [\sum_{i=1}^R (W_{ji} \cdot X_i) + b_j]$$

Donde X_i es la entrada de la neurona \mathbf{i} , W_{ji} es el peso que modifica la entrada de la neurona \mathbf{i} y que va hasta la neurona \mathbf{j} , b_j es el sesgo correspondiente a la neurona \mathbf{j} actual, y a_j es de dicha neurona su salida \mathbf{j} actual. El modo de operación de la unidad básica de procesamiento de información se describe en detalle a continuación:

Figura 4:

Estructura y funcionamiento de una neurona artificial.



Fuente: Hernández (2006)

Para esta figura 4 se da a conocer la estructura, además del funcionamiento de una RNA.

2.2.2.6 Funciones de activación

Según Collantes (2001), para la parte que involucra la selección de la función de activación de un nodo FA, se tomarán criterios de los investigadores con respecto al problema en cuestión a estudiar, que en la mayoría de situaciones se seleccionará por ensayo y error. Además, menciona que existirán variedad de FA (funciones de activación) los que se detallan a continuación:

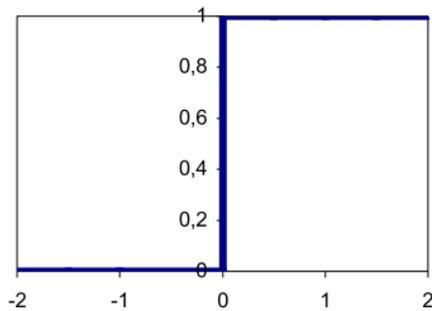
2.2.2.6.1 Función Escalón

El tipo de salida puede ser de 0 a 1, esto dependerá por el parámetro (positivo o negativo) en este tipo de FA. Es usado además para problemas de clasificación. En forma matemática se expresa de la manera siguiente:

$$f(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$$

Figura 5:

Función escalón.



Fuente: Collantes (2001)

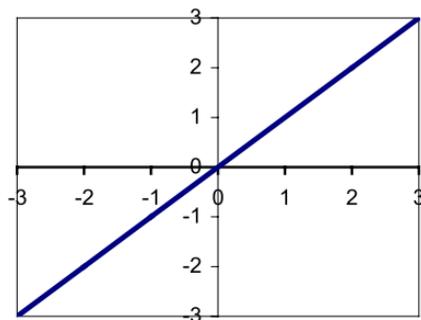
2.2.2.6.2 Función lineal

Para este tipo de función en la entrada de la FA será igual a la salida. Podemos mencionar que su uso es diverso, pero con mayor frecuencia para la capa de salida. A continuación, su expresión matemática:

$$f(x) = x$$

Figura 6:

Función lineal.



Fuente: Collantes Duarte (2001).

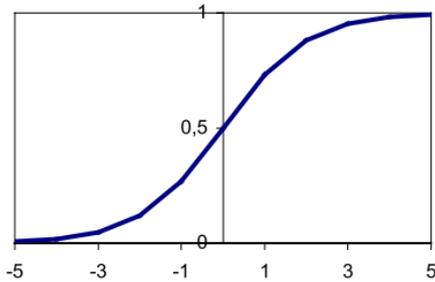
2.2.2.6.3 Función logística

Comprenderá valores que oscilan desde 0 hasta 1, se sabe también que esta función es de las más usadas en este campo de las redes neurales y es además recomendada para problemas de pronóstico. Cuya expresión matemática es la siguiente:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

Figura 7:

Función logística.



Fuente: Collantes Duarte (2001).

2.2.2.6.4 Función tangente hiperbólica

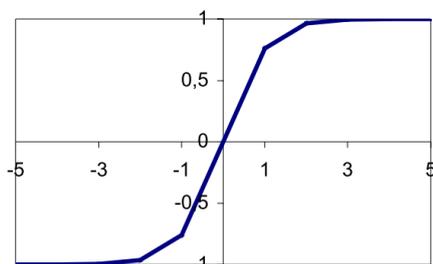
Cuya salida se encuentra entre valores de -1 y 1, se usará además con mayor uso en redes multicapa. Este tipo de función de activación será el usado en este proyecto de investigación. Su expresión matemática es la siguiente:

$$f(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$$

Función tangente hiperbólica

Figura 8:

Función tangente hiperbólica.



Fuente: Collantes (2001)

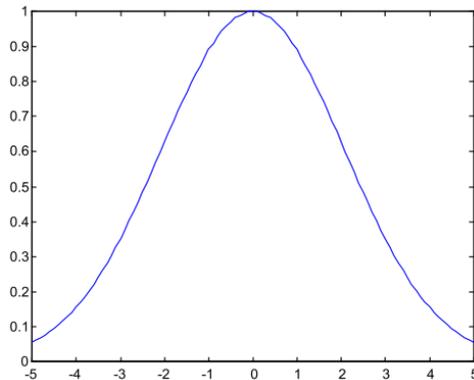
2.2.2.6.5 Función gaussiana

El rango comprendido va entre valores de 0 y 1. Se utiliza en RNA función base radial, estas son aptas para casos de pronóstico. Su expresión matemática será:

$$f(x) = e^{-x^2}$$

Figura 9:

Función gaussiana



Fuente: Collantes (2001)

2.2.2.7 Clasificación de las redes neuronales artificiales

Se muestra a continuación un esquema de clasificación de RNA según (Hernández, 2006) en función de los parámetros como el número de capas y la conectividad que se establece entre neuronas como se puede observar en la figura N° 4.

Figura 10:

Clasificación de las RNA.

CAPAS		CONECTIVIDAD		
Número de capas	Número de neuronas por capa	Tipo de conexiones	Tipo de información	Grado de conectividad
Monocapa	1 neurona	Hacia delante	Estática	Parcial
Multicapa	2 neuronas	Hacia atrás	Dinámica	Total
	⋮	Lateral		
	N neuronas	Con retardo		

Fuente: Hernández, 2006

En la figura 10 se muestra la clasificación de las redes neuronales artificiales de acuerdo a su número de capas y su conectividad.

2.2.2.5.1 Según el número de capas

2.2.2.5.1.1 *Redes monocapa*

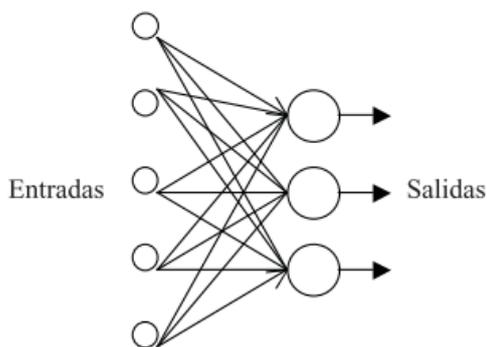
Como indica solo tienen una capa de neuronas que proyectan las entradas a una capa de neuronas de salida, donde se realiza el cálculo (Díaz, 2017). En las arquitecturas típicas de este tipo de red, las neuronas de entrada están interconectadas con las de salida en su totalidad (Machaca, 2016).

Las redes de una capa, como la mostrada en la figura 5 presentarán entradas directamente conectadas con las salidas mediante pesos (Ponce, 2010).

Red Neuronal Artificial de una capa o monocapa

Figura 11:

Red Neuronal Artificial de una capa o monocapa.



Fuente: Ponce, 2010

En la figura 11 se muestra la arquitectura para una red neuronal artificial con una sola capa o conocida también como mono capa.

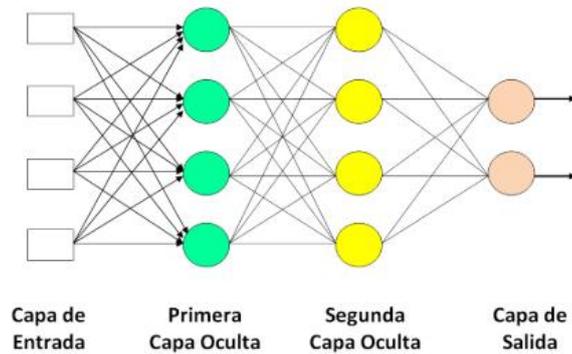
2.2.2.5.1.2 *Redes multicapa*

Una red multicapa consta de al menos una capa oculta entre las capas de entrada y salida de la ANN. Las redes multicapa pueden resolver problemas más complejos que las redes de una sola capa a cambio de tratar superficies más complejas y un entrenamiento más costoso y más dificultad para evitar los mínimos locales. En general, la dificultad del problema a resolver está relacionada con el tamaño de la red multicapa,

que se define por el número de cada capa oculta y de neuronas en cada una de ellas (Machaca, 2016).

Figura 12:

Red neuronal artificial multicapa.



Fuente: Machaca, 2016

En la figura 12 se muestra la arquitectura para una red neuronal artificial multicapa.

2.2.2.5.2 Según el tipo de conexiones

2.2.2.5.2.1 Conexiones hacia adelante

La dirección de la transferencia de información para esta conexión es desde las neuronas de las capas inferiores (más cercanas a la capa de entrada) a las neuronas de las capas superiores (más cercanas a la salida). A este tipo también se le denomina feedforward (Machaca, 2016).

2.2.2.5.2.2 Conexiones hacia atrás

Este tipo de conexiones transportan datos desde las neuronas de las capas superiores a otras neuronas de las capas inferiores. También llamadas feedbackward (Machaca, 2016).

2.2.2.5.2.3 Conexiones laterales

Se define como las conexiones que se establecen entre neuronas de una misma capa. Las conexiones laterales son diseñadas como excitadoras, permite así inhibición



(peso negativo) o su cooperación (peso positivo) entre neuronas, estableciendo competición entre neuronas de misma capa (Machaca, 2016).

2.2.2.5.2.3 Conexiones con retardo

Estas conexiones se fusionan con las conexiones existentes para implementar el modelo. Dinámica temporal (red dinámica). Es decir, se almacenan datos antiguos para después procesarlos de manera conjunta con la información actual (Machaca, 2016).

2.2.2.5.2.4 Conexiones auto-recurrentes

En esta conexión la salida de una neurona se conecta con su propia entrada (Machaca, 2016).

2.2.2.5.2.5 Redes neuronales recurrentes

Los lazos de realimentación caracterizan esta red. La retroalimentación incluye un retraso que permite conservar el valor del primer paso para los pasos de procesamiento posteriores. De esta forma, la red puede registrar información para futura referencia e identificar patrones temporales y espaciales (Machaca, 2016).

2.2.2.5.3 Según el tipo de información

2.2.2.5.3.1 Redes neuronales estáticas

El tipo de información que procesa una red estática es estacionario, es decir, el valor de la salida depende únicamente del valor de la entrada en el momento de la generación. Suelen estar asociados a redes con conexiones feedforward.

2.2.2.5.3.2 Redes neuronales dinámicas

La información procesada en este tipo de redes incluye variables de tiempo, es decir, variables de entrada cuyas salidas dependen del tiempo actual, así como valores de entrada y/o salida en tiempos anteriores. Para incluir variables de tiempo, se pueden incorporar a la red retrasos de tiempo o conexiones de tipo retroalimentación entre capas de neuronas. El entrenamiento de redes dinámicas puede introducir problemas de



convergencia y estabilidad, y los resultados suelen ser difíciles de analizar (Machaca, 2016).

2.2.2.6 Ventajas

(Díaz, 2017) en su estudio menciona algunas ventajas en el uso de redes neurales artificiales como se muestra a continuación:

- **No linealidad.** Los procesadores neuronales son básicamente no lineales, al igual que las RNA.
- **Aprendizaje.** Estas redes neurales artificiales tienen la capacidad de educarse a través de una fase llamada fase de aprendizaje. Esto implica alimentar la ANN con datos como entrada mientras se revela cuál es la salida (contestación) deseada.
- **Auto organización.** Las ANN crean sus propias representaciones de información en ellas, lo que reduce la carga para los usuarios.
- **Adaptabilidad.** Con capacidad de acordar sus parámetros (ajuste), esto incluso de manera que sea en tiempo real
- **Tolerancia a fallos.** Dado que la RNA almacena información de manera redundante, puede continuar respondiendo con una respuesta aceptable incluso si está parcialmente dañada.
- **Uniformidad en el análisis y diseño.** En esta parte permitirá avalar tipologías de manera precisa
- **Tiempo real.** Para esta estructura de RNA será de manera paralela, quiere decir que, si se implementa con una computadora o equipo electrónico especial, la respuesta se puede obtener en tiempo real.

2.2.3 Modelamiento con redes neuronales artificiales

Barría (2010) mencionó 2 dificultades con el uso de supuestos del modelo con ANNs; al considerar redes interconectadas, se necesita calibrar una gran cantidad de



pesos, y debido a la alta no linealidad del sistema, cada neurona aporta una no linealidad al cálculo de la red función, lo que resulta en el tiempo de procesamiento de datos. Entonces, el método a usar necesita dividir los datos en 3 grupos de la siguiente manera:

A continuación, se sigue un proceso iterativo para definir posibles arquitecturas de redes neuronales, el número de nodos y el número de capas que implementa en base a prueba y error. Luego, la red se entrena y valida utilizando los conjuntos de datos definidos para estas tareas.

Finalmente, se evalúa la red con el equipo de prueba, y finalmente se pronóstico. Estas actividades descritas se llevarán a cabo en diferentes iteraciones.

Arquitectura o configuración, elija la arquitectura o configuración que le proporcione mejores resultados.

- Datos de entrenamiento: corresponde al 50% de los datos.
- Datos de validación: 25% de los datos.
- Datos de prueba: 25% de los datos.

A continuación, se sigue un proceso iterativo para definir posibles arquitecturas de redes neurales, número de nodos y de capas que logra a base de prueba y errores. Luego se entrena la red y validamos con los conjuntos de datos definidos para estas labores. Finalmente se evalúa la red con el conjunto de prueba, y finaliza con la realización de un pronóstico. Estas actividades descritas se llevarán a cabo iterativamente con distintas arquitecturas o configuraciones, escogiéndose la que entregue mejores resultados.

En su estudio además Barría (2010) da un mayor énfasis al entrenamiento de la red, dada las características y por contar con un número menor de estos formándose de la siguiente manera:

- Datos de entrenamiento: corresponde al 70% de los datos.
- Datos de validación: 15% de los datos.



- Datos de prueba: 15% de los datos.

2.2.3.1 Arquitectura

Según Hernández (2006) la organización y disposición de las neuronas en capas ocultas, así como el tipo de conexiones existentes entre ellas, viene a definirse como arquitectura de las RNA. Esta arquitectura como su elección para una aplicación en particular, viene a ser un tema clave para encontrar su respectiva solución al problema a tratar. Pudiendo elegirse entre dos enfoques según se trate de predecir un solo concepto (múltiples entradas y una sola unidad de salida) así mismo contiene una función de activación para modificar la unidad de salida.

2.2.3.2 Entrenamiento

Para el entrenamiento, puede usar diferentes algoritmos de aprendizaje, hay aprendizaje supervisado y aprendizaje no supervisado, también debe considerar el tipo de aprendizaje y el algoritmo de entrenamiento, como la retropropagación conocida como el algoritmo de propagación de error inverso o hacia atrás (Machaca, 2016).

2.2.3.3 Validación y evaluación de modelos

Las medidas de error son una de las herramientas más comunes para determinar la precisión de las predicciones. Estas medidas utilizan valores absolutos o errores al cuadrado. Como regla general, cuanto menor sea el error absoluto o la suma de los cuadrados, más preciso será el ajuste del modelo.

Según Alegre et al. (2003) mencionó que una vez que se completa el proceso de aprendizaje y se calculan los pesos de la red neuronal, es importante verificar la calidad del modelo resultante. Por ejemplo, en el caso del aprendizaje supervisado, se puede dar una métrica de calidad en términos del error entre el valor de salida esperado y el valor obtenido por la red neuronal. Algunas medidas estadísticas para medir la precisión del pronóstico son las siguientes.

a) Coeficiente de determinación R^2

Según Mendenhall et al. (2010) este coeficiente se puede interpretar como aquel porcentaje de reducción en la variación total en el experimento, que viene a ser obtenido al usar $\hat{y} = a + bx$ la recta de regresión que en lugar de ignorar x y usar la media muestral \bar{y} para predecir la variable de respuesta y . Además de determinar la calidad del modelo para replicar los resultados, y así la proporción de variación de resultados pudiendo explicarse por el modelo. Además R^2 es 1 en predictores perfectos.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(y - \hat{y})^2}{\sum(y - \bar{y})^2} \quad (1.4)$$

Donde de la fórmula 1.4 se tiene:

R^2 = Coeficiente de determinación

\hat{y} = Variable dependiente estimada

\bar{y} = Promedio de la variable dependiente

y = Variable dependiente

Machaca (2016) menciona que además de medir la capacidad explicativa de un modelo, permite además elegir entre varios modelos el más adecuado.

Por lo tanto, un modelo con la misma variable dependiente y el mismo número de variables explicativas, será más adecuado un modelo con un mayor coeficiente de determinación.

b) Coeficiente de correlación (r)

Según (Barría, 2010), el coeficiente hace mención a la raíz cuadrada del coeficiente de determinación como indica *la fórmula (1.5)*, siendo medida del grado de asociación entre dos variables, en el caso de ser independientes en su totalidad el coeficiente de correlación toma valor cero.

$$r = \sqrt{R^2} \quad (1.5)$$



Según Gutiérrez & De la Vara (2008), el coeficiente de correlación permitirá medir la asociación entre dos variables o medir la fuerza de la asociación. El coeficiente de correlación está entre +1 y -1 y se interpreta de la siguiente manera:

- Para un valor de $r = +1$, una correlación positiva completa o directa, es decir, al aumentar o disminuir el valor de la variable independiente (VI), aumenta o disminuye el valor de la variable dependiente (pendiente positiva).
- Para valor de $r = -1$ indica una perfecta correlación negativa o inversa, aumentando o disminuyendo el valor de la variable independiente disminuye o aumenta el valor de la variable dependiente (pendiente negativa).

Rangos del coeficiente de correlación:

$r = 0.2$ a $r = 0.3$	coeficiente de correlación muy bajo
$r = 0.4$ a $r = 0.5$	coeficiente de correlación bajo.
$r = 0.6$ a $r = 0.7$	coeficiente de correlación alto.
$r = 0.8$ a $r = 1.0$	coeficiente de correlación muy alto.

2.2.4 Perceptrón multicapa

Un perceptrón multicapa es un tipo de red neural formada por diversas capas de neuronas, las mismas que son compuestas con el objetivo de aventajar la linealidad del perceptrón simple y por ende resolver problemas que no son linealmente separables, que es su principal restricción (Díaz, 2017).

2.2.5 Parámetros de la red

Según Pino et al. (2001) tienen en cuenta ciertos parámetros para formular la mencionada red. A continuación, mencionaremos las siguientes:



- **Topología de la red.** La topología de la red tiene en cuenta el número y la definición de las variables de entrada y salida del sistema a desarrollar, y el modelo la red utilizada, como el perceptrón multicapa más común, grafica de kohonen et al. También define la red neuronal para cada capa el número de elementos y función de activación (Díaz, 2017). Los parámetros necesarios para la red se describen a continuación.

Wij: el peso que relaciona de la neurona i a la neurona j

Wjk: el peso que relaciona de la neurona j a la neurona k

N: El número de neuronas en la capa de entrada.

O: El número de neuronas en la capa oculta.

Y: El número de neuronas en la capa de salida.

- **Algoritmo de aprendizaje.** Para el desarrollo de las redes neuronales, de los algoritmos más utilizados tenemos al backpropagation y todas sus variantes (Díaz, 2017). Las fases que presenta este algoritmo son:

Fase de Aprendizaje o Entrenamiento Utilizan entradas y salidas.

Fase de Recuerdo o Reconocimiento Requiere datos de entrada de etapa de llamada o reconocimiento y ANN y usando la función generada en la etapa anterior (aprendizaje), generar datos resultantes (salida).

2.2.6 Herramientas de aplicación

2.2.6.1 Lenguaje Matlab

MATLAB es un lenguaje técnico para aplicaciones informáticas.

Caja de herramientas. MATLAB trae incorporado el toolbox. Tiene muchos modelos matemáticos, incluidas demostraciones. En esta herramienta se encuentra NEURAL NETWORK, que es el administrador de tipo de red neuronal, que contiene

paneles de demostración y administración de nuevas redes y sus respectivos parámetros, lo cual es muy útil para trabajar con redes neuronales artificiales (Díaz, 2017).

Los algoritmos de aprendizaje son los siguientes:

- Trainlm

Según MathWorks (2022) o algoritmos de actualización de pesos y ganancias según optimización Levenberg-Marquardt. Es el algoritmo más rápido en la red de retropropagación. Si el entrenamiento es largo, se recomienda reducir el jacobiano.

La sintaxis de este algoritmo según MathWorks (2022) es la siguiente:

- `net.trainParam.epochs`: Máximo número de iteraciones del entrenamiento
- `net.trainParam.goal`: Error deseado
- `net.trainParam.lr`: Parámetro de aprendizaje
- `net.trainParam.max_fail`: Máximo número de veces que falla el valor de Mu
- `net.trainParam.mem_reduc`: Factor de fraccionamiento de Jacobiano para

ahorrar memoria

- `net.trainParam.min_grad`: Mínimo rendimiento del gradiente
- `net.trainParam.show`: Intervalo de visualización de los resultados.
- `net.trainParam.time`: Máximo tiempo de entrenamiento en segundos
- `tr.mu`: Valor del Mu adaptivo

- Trainbr

La sintaxis de este algoritmo según (MathWorks, 2022) es la siguiente:

- `net.trainParam.epochs`— Número máximo de épocas para entrenar. El valor predeterminado es 1000.
- `net.trainParam.goal`- Objetivo de rendimiento. El valor predeterminado es 0.
- `net.trainParam.mu`— Parámetro de ajuste de Marquardt. El valor predeterminado es 0,005.



- `net.trainParam.mu_dec`— Factor de disminución para μ . El valor predeterminado es 0,1.
- `net.trainParam.mu_inc`— Factor de aumento para μ . El valor predeterminado es 10.
- `net.trainParam.mu_max`— Valor máximo para μ . El valor predeterminado es $1e10$.
- `net.trainParam.max_fail`— Máximo de errores de validación. El valor predeterminado es `inf`.
- `net.trainParam.min_grad`— Gradiente mínimo de rendimiento. El valor predeterminado es $1e-7$.
- `net.trainParam.show`— Épocas entre pantallas (NaNsin pantallas). El valor predeterminado es 25.
- `net.trainParam.showCommandLine`— Generar salida de línea de comandos. El valor predeterminado es `false`.
- `net.trainParam.showWindow`— Mostrar GUI de entrenamiento. El valor predeterminado es `true`.
- `net.trainParam.time`— Tiempo máximo para entrenar en segundos. El valor predeterminado es `inf`.

2.2.7 Sistema de pronóstico

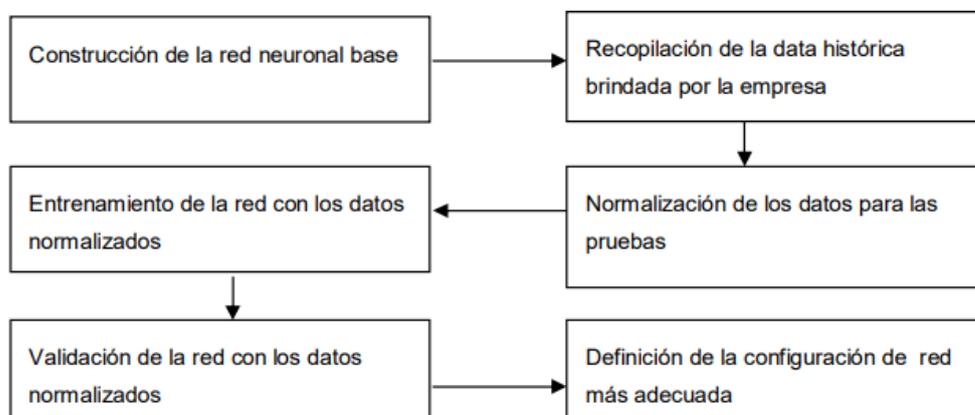
Aquí se presenta el diseño adecuado de estructura arquitectonica recomendable de red neuronal para el problema en cuestión, comprendiendo así la creación y validación de la RNA de predicción en este caso de la resistencia y trabajabilidad del concreto ligero con MEPS. Se muestra la topología de red neural como modelo predictivo y el prototipo de red más adecuado.

2.2.7.1 Flujo de procesos

A continuación, se verá los pasos a alcanzar para la elaboración del sistema propuesto. El esquema será el de un movimiento de procesos para predicciones usando RNA.

Figura 13:

Flujo de métodos propuesto para el predicción de la resistencia a compresión y trabajabilidad del concreto.



Fuente: Cox & Popken (2002)

En la figura 13 se muestra el flujo de procesos para el pronóstico de la resistencia la compresión.

2.2.7.2 Construcción de la red neuronal base

Se iniciará de los parámetros de la red correspondientes a las variables de acreditados del pronóstico para su respectiva construcción de dicha red. Además, en cuanto a la topología esta se obtendrá mediante ensayo y error hallando así valores óptimos de número de capas ocultas, así como de las neuronas por cada capa, etc.

2.2.7.2.1 Definición de las variables de entrada

Para la obtención de la red que prediga correctamente, las variables a utilizar deben elegirse cuidadosamente, y son las variables predictoras que se incluyen en el modelo las que realmente predicen la variable dominada. La introducción de variables no

correlacionadas puede dar lugar a un sobreajuste innecesario en el modelo (Díaz, 2017). En capítulo 3 se describirá a detalle las variables de entrada a tener en cuenta para este proyecto para el análisis de la red neural artificial.

2.2.7.2.2 Definición de las variables de salida

El objetivo es predecir la resistencia a compresión y trabajabilidad del concreto ligero MEPS (ensayos en laboratorio) por lo cual el análisis constara de dos variables de salida.

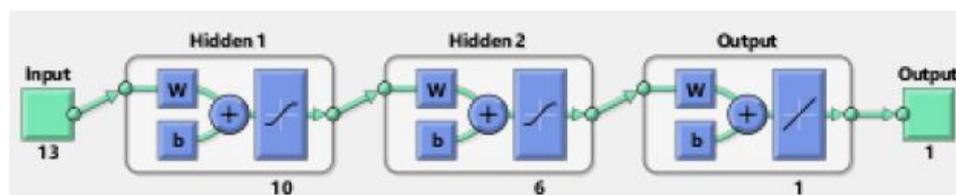
Se cuenta además con diferente diseño de mezcla con diferentes proporciones MEPS de los cuales se desea hallar sus respectivas resistencias y trabajabilidades, estos procesos para la predicción se dará a conocer más adelante.

2.2.7.2.3 Topología de la red

El tipo de red neural que utilizaremos será perceptrón multicapa. La red neural conformada de cuatro capas (1 de entrada, 2 ocultas y 1 de salida), para la capa de entrada constará de 13 neuronas representando el conjunto de variables de entrada, además es importante mencionar que en las capas ocultas se establecerán por experimento ensayo y error, además la capa de salida constará de una unidad básica, representando el resultado del sistema.

Figura 14:

Esquema del diseño de la red neural – MATLAB.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

En la figura 14 podemos notar el diseño de la RNA utilizando el software Matlab.

Se muestra la topología de la red desarrollada:



- Tipo de red: Perceptrón multicapa, es decir una red con conexión hacia adelante.
- Número de variables en capa de entrada: 16.
- Número de capas ocultas: De acuerdo por ensayo y error 2.
- Número de neuronas en las capas ocultas: Hallado mediante las pruebas de entrenamiento, mostrados en el capítulo 4.
- Número de neuronas en la capa de salida: 1.
- Algoritmo de aprendizaje y validación: Backpropagation.

2.2.7.2.4 Fase de entrenamiento

Esta fase de la red neural sirve para unir un patrón de entradas a uno de salida donde la red neural artificial puede aprender a predecir en este caso de forma aproximada la resistencia a la compresión y trabajabilidad del concreto ligero MEPS de acuerdo al correcto mapeo y conocimiento almacenado (configuración de pesos y bias) (Hilera & Martínez, 1995).

2.2.7.2.5 Fase de validación

La fase de validación representa el grado de generalización de la red neuronal, es decir, es la capacidad de la red para dar respuestas correctas a patrones que no fueron utilizados en su entrenamiento (Hilera & Martínez, 1995).

2.2.8 Concreto

Es un combinado, que consiste de un medio aglutinante llamado pasta, en el que se reciben partículas llamada agregado. El resultado es la pasta que es una combinación de materiales cementosos y el agua. Es una etapa continua de hormigón, porque siempre se combina con algo de sí mismo en todo el conjunto (Rivva, 2000).

Es la mezcla de cemento Portland o cualquier otro cemento hidráulico, agregado fino, agregado grueso y agua, con o sin aditivos (Norma E.060, 2017, p. 14).



Es importante mencionar que la reacción química entre el material cementante y agua une las partículas de agregado para formar un material diverso. A veces agregan ciertas sustancias, llamadas aditivos, pueden mejorar o cambiar ciertas propiedades del hormigón (Abanto, 2009).

2.2.8.1 Tipos de concreto

En proyecto se detallan algunos tipos de concreto.

2.2.8.1.1 Concreto convencional

Mezcla de cemento Portland, agua y varios tamaños de áridos mayores de 5 mm, como las gravas y arenas.

El concreto convencional se utiliza mucho en las estructuras de hormigón más habituales con entre resistencias (175 kg / cm² - 350 kg / cm²). De acuerdo con el tamaño y los elementos a vaciar, es que se va especificar el tipo de agregado requerido y su proporción para determinar la dosificación (Pasquel, 1998).

2.2.8.1.2 Concreto armado

Concreto armado o reforzado que es un concreto estructural reforzado con no menos de la cantidad mínima de acero, preesforzado o no (Norma E.060, 2017, p 14).

En este concreto con armadura de acero en su interior, debidamente calculado y colocado, el acero puede resistir la fuerza de tracción de la estructura.

2.2.8.1.3 Concreto postensado

Se denomina al concreto que después de haber sido vertido y fraguado, se somete a presión por medio de armaduras activas (cables de acero). Postensado es una forma de hormigón pretensado donde la armadura se tensa una vez que el concreto ha adquirido su resistencia característica (Borrás, 2010).

2.2.8.1.4 Concreto ciclópeo

El concreto ciclópeo es un tipo de concreto con piedra añadida. Estos pueden venir en diferentes tamaños, pero generalmente son piedras bastante grandes. Por razones obvias, no se agrega piedra al hormigón o a la mezcladora durante el proceso de fabricación este va enterrado. (Gutiérrez, 2003).

2.2.8.1.5 Concreto ligero

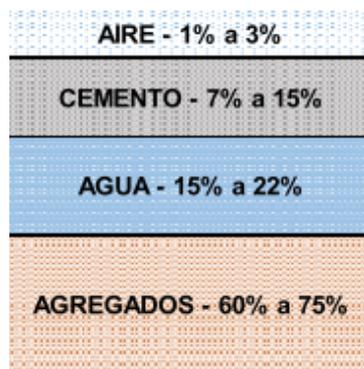
Se define como el concreto que alcanza una resistencia a la compresión a los 28 días entre valores que van de 175 y 250 kg/cm², según el diseño, pero que su peso unitario varía de 800 a 1600 kg/m³ (Gutiérrez, 2003).

2.2.8.2 Elementos del concreto

Los elementos principales en la preparación del concreto son: agua, agregados, cemento y aditivos.

Figura 15:

Proporciones típicas en volumen absoluto de los componentes del concreto



Fuente: Heredia & Pérez, 2018

En la figura 15 se muestra las proporciones típicas de volumen del concreto.

2.2.8.2.1 Cemento

2.2.8.2.1.1 Definiciones

Cemento Natural

Normativa: NTP 334.001



Un cemento hidráulico producido, calcinando caliza arcillosa, a temperaturas por debajo del punto de sinterización y luego moliéndola hasta obtener un polvo fino.

Cemento Hidráulico

Normativa: NTP 334.001

Cemento que forma una pasta aglutinante capaz de endurecerse mediante la adición de una cantidad adecuada de agua.

Cemento Portland

Normativa: NTP 334.001

El cemento hidráulico producido mediante la pulverización del clínker Portland que consiste principalmente en silicato de calcio hidráulico.

2.2.8.2.1.2 Clasificación y uso de los cementos

Respecto a la NTP 334.009 tenemos los siguientes tipos de cemento:

Tipo I: Usado para concretos que no exijan propiedades particulares.

Tipo II: Cuando se desea moderada moderado calor de hidratación o resistencia a sulfatos.

Tipo III: Para ser utilizado cuando se requiere altas resistencias iniciales.

Tipo IV: Para emplearse cuando se desea bajo calor de hidratación.

Tipo V: Para emplearse cuando se desea alta resistencia a los sulfatos.

2.2.8.2.2 Agregados

2.2.8.2.2.1 Definiciones

AGREGADO PARA CONCRETO

Normativa: NTP 400.011

Conjunto de granos de piedra natural o artificial, que pueden ser tratados o procesados, dentro de límites especificados en la NTP 400.037 en tamaño.



AGREGADO FINO

Normativa: NTP 400.011

Es un agregado artificial de roca o piedra, natural o artificialmente descompuesta que pasa a través de una malla estándar de 9.5 mm (3/8 pulg) cumpliendo con límites señalados en la NTP 400.037.

AGREGADO GRUESO

Normativa: NTP 400.011

El agregado es retenido en un tamiz estándar de 4,75 mm (No. 4), provenientes de la desintegración de la roca.

2.2.8.2.2.2 Requisitos

2.2.8.2.2.2.1 Granulometría

Normativa: NTP 400.012

Representa la distribución del tamaño de los agregados. La NTP 400.012 establece un procedimiento para la partición por zarandeado, obteniendo la masa de la fracción de áridos retenida en cada tamiz, y finalmente calculando la masas retenidas y acumulados.

2.2.8.2.2.2.2 Granulometría del agregado grueso

De acuerdo a la NTP 400.037 la granulometría cumplirá requerimientos de Tabla N.º 2.

2.2.8.2.2.2.3 Granulometría del agregado fino

Los distribución para el agregado fino y sus límites están establecidos en la NTP 400.037 Tabla N.º 3.

El concreto con finos con deficiencias en los porcentajes de las mallas N.º 50 (300 um) y N.º 100 (150 um) de malla puede tener dificultades con la trabajabilidad, el bombeo

o la exudación excesiva, lo que se puede subsanar mediante adiciones (filler) o incorporación de material aditivado para regular el aire.

El módulo de fineza que está recomendado está entre 2,3 y 3,1.

Tabla 2:

Requisitos Granulométricos de Agregado Grueso

Tamaño nominal (mallas con aberturas cuadradas)	CANTIDADES MENORES QUE PASAN CADA MALLA DE LABORATORIO (ABERTURAS CUADRADAS) % EN PESO												
	100 mm	90 mm	75 mm	63 mm	50 mm	37.5 mm	25 mm	19 mm	12.5 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm
	4"	3.54"	3"	2.5"	2"	1.5"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	Nº 4	Nº 8	Nº 16
3.5" a 1.5"	100	90 a 100	-	25 a 60	-	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-	-	-
2.5" a 1.5"	-	100	-	90 a 100	35 a 70	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-	-	-
2" a 1"	-	-	-	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-	-
2" a Nº 4	-	-	-	100	95 a 100	-	35 a 70	-	10 a 30	-	0 a 5	-	-
1.5" a 3/4"	-	-	-	-	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-
1.5" a Nº 4	-	-	-	-	100	95 a 100	-	35 a 70	-	10 a 30	0 a 5	-	-
1" a 1/2"	-	-	-	-	-	100	90 a 100	20 a 55	0 a 10	0 a 5	-	-	-
1" a 3/8"	-	-	-	-	-	100	90 a 100	40 a 85	10 a 40	0 a 15	0 a 5	-	-
1" a Nº 4	-	-	-	-	-	100	95 a 100	-	25 a 60	-	0 a 10	0 a 5	-
3/4" a 3/8"	-	-	-	-	-	-	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	0 a 5	-	-
3/4" a Nº 4	-	-	-	-	-	-	100	90 a 100	-	25 a 55	0 a 10	0 a 5	-
1/2" a Nº 4	-	-	-	-	-	-	-	100	90 a 100	40 a 70	0 a 15	0 a 5	-
3/8" a Nº 8	-	-	-	-	-	-	-	-	100	85 a 100	10 a 30	0 a 10	0 a 5

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 2 se muestra los requisitos granulométricos del agregado grueso de acuerdo a la NTP 400.037.

Tabla 3:

Requisito granulométrico de agregado fino.

Tamiz	Porcentaje que Pasa (%)
9.5 mm (3/8 pulg)	100
4.75 mm (Nº 4)	95 a 100
2.36 mm (Nº 8)	80 a 100
1.18 mm (Nº 16)	50 a 85
600 um (Nº 30)	25 a 60
300 um (Nº 50)	05 a 30
150 um (Nº 100)	0 a 10

Fuente: NTP 400.037

En la tabla 3 se muestra los requisitos granulométricos del agregado fino de acuerdo a la NTP 400.037.

2.2.8.2.3 Agua

2.2.8.2.3.1 Definición

De acuerdo a la NTP 339.088, 2006, da la definición de agua potable, como el agua que es apta para el consumo humano, además debe cumplir con los requisitos de dicha norma.

Requisito de los límites permisibles del agua para concreto:

Tabla 4:

Requisitos de los límites permisibles del agua para concreto.

Descripción	Límite permisible
Sólidos en suspensión	5 000 ppm. máximo
Materia Orgánica	3 ppm. máximo
Alcalinidad (NaHCO ₃)	1 000 ppm. máximo
Sulfato (Ión SO ₄)	600 ppm. máximo
Cloruros (Ión Cl)	1 000 ppm. máximo
pH	5 a 8

Fuente: NTP 339.088

En la tabla 4 se muestra los requisitos límites permisibles del agua para concreto de acuerdo a la NTP 339.088.

2.2.9 Concreto Ligero

El hormigón ligero se produce utilizando diferentes materiales como materia prima, como el uso de agentes gaseosos, como el polvo de aluminio o los agentes espumantes; el uso de agregados minerales ligeros como la perlita, la vermiculita expandida, la piedra pómez, la pizarra o la arcilla; los materiales plásticos como como poliuretano, espuma de poliestireno expandido (EPS) u otros materiales poliméricos se pueden utilizar como ingredientes para hacer hormigón ligero (Heredia & Pérez, 2018).

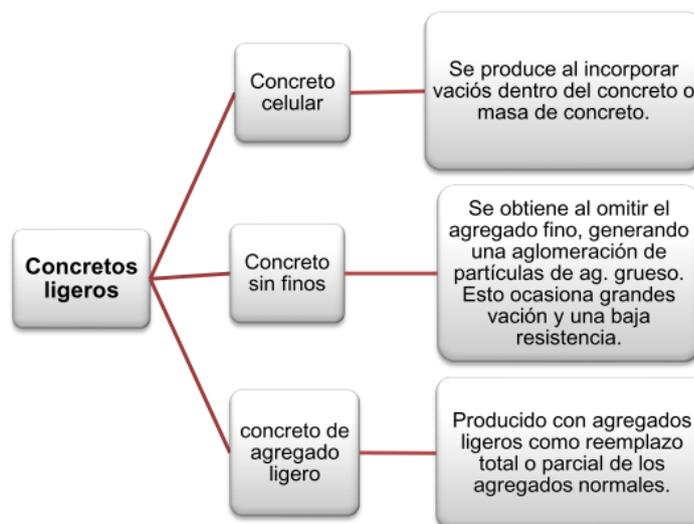
2.2.9.1 Clasificación del concreto ligero

El hormigón o concreto ligero se obtiene reemplazando total o parcialmente los agregados que se suelen utilizar para fabricar hormigón convencional, y suele clasificarse como tal por su peso específico entre 300 kg/m³ y 1850 kg/m³ como se especifica en el Reglamento Nacional de Edificaciones E.060.

Neville (2010) en su libro Tecnología del concreto sugiere clasificar de acuerdo al método en el que fueron producidos, dicha clasificación se ve por conveniente explicar de forma resumida a continuación:

Figura 16:

Clasificación de concreto ligero de acuerdo a su producción.



Fuente: Vega More, 2019

En la figura 16 la clasificación de los concretos ligeros acorde a su producción.

2.2.9.2 Agregados ligeros

El concreto es un material heterogéneo cuyas propiedades están determinadas principalmente por sus componentes y la compatibilidad entre ellos. Las propiedades que cambian en hormigón incluyen la resistencia mecánica, el módulo de elasticidad, las propiedades térmicas, la trabajabilidad, densidad, etc.

Se deben comprender las propiedades del agregado liviano que se utilizará para producción de concreto liviano estructural. El caso es que, en este proyecto, debido al poliestireno expandido sin modificar, su resistencia de este material es casi nula (Lamond & Pielert, 2006).

Por ello es que además se trabaja con poliestireno expandido modificado cuyos valores de resistencia mostrados y hallados más adelante, permiten agruparlo dentro de los concretos ligeros estructurales.

2.2.9.3 Clasificación de los agregados ligeros

Álvarez & Saez (2012), en su libro Hormigón Ligero menciona la existencia de una gran variedad de áridos de baja densidad, tanto naturales como industriales.

Figura 17:

Agregados ligeros naturales como (a) pumita y (b) diatomita, y artificiales como (c) arcilla expandida y (d) perlita expandida.



Fuente: Rodríguez, 2017

En la figura 17 se muestra agregados livianos naturales y artificiales.

2.2.9.4 Propiedades del concreto ligero

2.2.9.4.1 Densidad

La densidad (peso volumétrico, unidad de masa) dependerá de la firmeza, porosidad, gravedad específica y tamaño de partícula de agregados y aglomerantes involucrados en su elaboración, así como las proporciones de la mezcla, colocación, etc.

[Concreto Ligero], (n.d.). En la tabla siguiente se muestran valores para el tipo de concreto ligero:

Rango de variación de pesos volumétricos para distintos tipos de concretos ligeros.

Tabla 5:

Rango de variación de pesos volumétricos para distintos tipos de concretos ligeros.

Tipo de Concreto Ligero	Peso Volumétrico kg/m³.
Sin finos (agregado normal)	1600 - 1900
Sin finos (agregado ligero)	700 - 300
Clinker	1000 - 1600
Escoria espumosa	950 - 1600
Concreciones de ceniza de combustible	950 - 1800
Arcilla o pizarra expandida	800 - 1800
Pómez	700 - 1100
Vermiculita exfoliada	500 - 950
Perlita expandida	400 - 950
Aserrín	650 - 1300
Celular o aireado	400 - 1600

Fuente: Concreto Ligero, (n.d). Densidad para diferentes tipos de concreto ligero

En la tabla 5 se aprecia el rango de cambio de los pesos volumétricos de los diferentes tipos de concreto ligero.

2.2.9.4.2 Resistencia a la compresión

La resistencia de un mismo tipo de hormigón ligero puede variar, dependiendo de la relación agua-cemento utilizada, el peso volumétrico de su fabricación, y contenido de humedad, en el que también está el sistema de curado. Se distingue en concreto ordinario, la comparación de agua y material cementante, es un indicativo para resistencia, que no es el caso en la mayoría de hormigón ligero, la base utilizada es se refiere al contenido de cemento para un asentamiento dado. Además, incluso si la resistencia varía bastante, por

lo que es fácil establecer una idea sobre el rango, dentro de cada grupo, también están asociados a sus respectivos pesos volumétricos.[Concreto Liger], (n.d.):

Rangos de resistencia a compresión para concretos ligeros:

Tabla 6:

Rangos de resistencia a compresión para concretos ligeros.

Tipo de Concreto Liger	Resistencia	Peso Volumétrico kg/m³.
Sin finos (agregado normal)	50 a 90	1800 a 2000
Sin finos (agregado ligero)	70 a 500	500 a 2100
Aereados	15 a 60	400 a 1600

Fuente: Concreto Liger, (n.d.). Resistencia a compresión de concretos ligeros

En la tabla 6 se puede apreciar los rangos de resistencia a compresión de acuerdo al tipo de concretos ligeros.

2.2.9.4.3 Absorción de agua y porosidad

En diferentes tipos de hormigón ligero se pueden observar diferentes grados de absorción. Así, por ejemplo, los concreto aireados tiene una mayor tasa de absorción que el hormigón con agregados livianos. Es bien sabido que la porosidad se puede determinar en base al peso volumétrico, además, la mayoría de los hormigones livianos tienen una porosidad bastante alta y por lo tanto tienen una mayor capacidad de absorción que el hormigón normal. Sin embargo, esto no tiene un efecto significativo, ya que cuando se desgastan suelen estar protegidos por una capa adicional [Concreto Liger], (n.d.).

2.2.9.4.4 Aislamiento térmico

En cuanto a esta propiedad, ésta será de manera aproximada proporcional al peso volumétrico del material. Propiedad básica en esta clase de hormigón.

Existen índices por los cuales se miden las propiedades térmicas de un material:

- a) Conductividad térmica: es calor que pasa a través de un solo objeto, superficie uniforme de un material de unidad de espesor. Por tanto, el valor de este



coeficiente depende del peso volumétrico, la porosidad, la conductividad, la composición y el contenido de humedad del hormigón. Es importante mencionar el concreto con agregado ligeros este factor varía entre 0,351 y 0,76 kcal/m.h.gr, mientras que en hormigones normales estos valores están entre 1,39 y 1,51 kcal/m.h.gr.[Concreto Ligero], (n.d.).

- b) Transmisibilidad térmica U.- Cantidad de calor transferido para una unidad de superficie de una pared o techo en una hora cuando la temperatura ambiente entre superficies opuestas de la superficie difiere en 1 grado. La conductividad K se refiere a materiales simples, mientras que el valor de la conductividad U corresponde a un sistema compuesto de pared.

En general, el uso de hormigón ligero con un peso volumétrico inferior a 1600 kg/m³ puede comprimir la pérdida de calor, éstas mediante las paredes por ejemplo en un 40% o 50%. [Concreto Ligero], (n.d.).

2.2.9.4.5 Protección contra el fuego

Es entre un 20 % y un 50 % mejor que el hormigón normal debido a su mayor resistencia a la transferencia de calor y al hecho de que el hormigón ligero es un material no combustible. Por otro lado, se ha observado que cuando exponemos el material a alta temperatura, conserva alrededor del 85% de su resistencia original, mientras que la resistencia del hormigón normal se reduce al 50% [Concreto Ligero], (n.d.).

2.2.9.4.6 Propiedades acústica

El aislamiento acústico reduce el paso de sonido a través de un cuerpo, cabe mencionar que el concreto y su densidad son determinantes en esta propiedad. El concreto ligero no tiene buenas propiedades en cuanto a aislamiento acústico hablemos, pero en cuanto a absorción de sonido si es una propiedad satisfactoria de los concretos ligeros, es



decir para el aislamiento acústico podemos lograr que tengan un buen aislamiento si recubrimos de una pasta de cemento los bloques de concreto ligero.

Dado que la absorción acústica se menciona como una propiedad ventajosa en el concreto liviano, esta propiedad es más pronunciada cuando la superficie del concreto no está cubierta con pasta, es necesario saber qué es lo que realmente queremos, porque si se requiere aislamiento externo, es conveniente un recubrimiento adicional de hormigón: si hablamos de aislamiento interno, este recubrimiento sería desventajoso.[Concreto Ligero], (n.d.).

2.2.10 Poliestireno expandible (EPS)

2.2.10.1 Concepto

El poliestireno expandido (EPS) es un material liviano y plástico compuesto de finas partículas esféricas compuestas de aproximadamente un 98 % de aire y un 2 % de poliestireno. Tiene una estructura de celda cerrada y no puede absorber agua. Por lo tanto, tiene buenas propiedades de aislamiento acústico y térmico, así como resistencia al impacto (Cook, 1983, como se citó en Tengku, 2006).

Además, el EPS no contiene clorofluorocarbono (CFC) ni hidroclorofluorocarbono (HCFC) (Chen & Liu, 2004). Por lo tanto, el concreto liviano de perlas de poliestireno es seguro para el medio ambiente y no causa daño a la capa de ozono. Además, dado que los polímeros de poliestireno no tienen valor nutricional, no provocan el crecimiento de hongos ni de ninguna otra bacteria y no tienen efectos peligrosos en plantas o animales.

2.2.10.2 Fabricación del poliestireno expandible

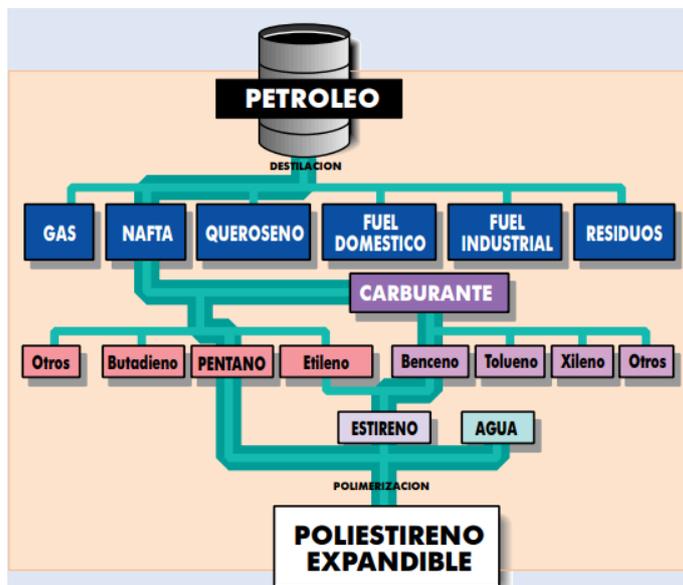
El proceso productivo para la obtención de Poliestireno Expandido utiliza como materia prima el Poliestireno Expandible, el cual se obtiene de la Polimerización del Estireno en presencia de un agente expansor (pentano) (ANAPE, 2015). Como todos los

materiales plásticos, esta materia prima se deriva del petróleo. Sin embargo, el 94% del petróleo se utiliza para transporte y combustible para calefacción, y el 6% restante se utiliza para petroquímica (fabricación de plásticos y productos químicos) (ANAPE, 2015).

Proceso de fabricación del Poliestireno Expandido

Figura 18:

Proceso de fabricación del Poliestireno Expandido.



Fuente: Construcción-eps (2007)

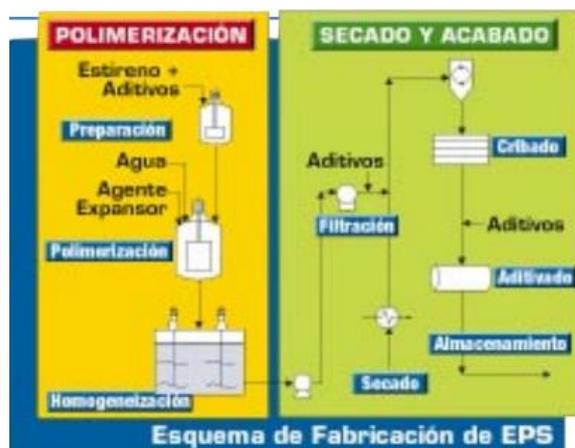
En la figura 18 se muestra el proceso de fabricación del poliestireno expandido.

2.2.10.3 Proceso de fabricación

Este proceso sigue dos etapas la polimerización y el secado y el acabado como se muestra en la siguiente figura:

Figura 19:

Proceso de producción del Poliestireno Expandido.



Fuente: Construcción-eps (2007)

En la figura 19 se muestra el proceso de producción del poliestireno expandido el cual comprende desde un proceso de polimerización y termina en el secado y acabado.

Figura 20:

Perlas de poliestireno expandido



Fuente: Construcción-eps (2007)

En la figura 20 se muestra las perlas de poliestireno expandido EPS.

2.2.10.5 Propiedades y aplicaciones

Las propiedades y aplicaciones son las relacionadas con la resistencia mecánica y el aislamiento térmico. A continuación, mencionaremos algunas diferencias entre propiedades de concretos ligeros con EPS y sin EPS.

Tabla 7:

Diferencias entre propiedades de los concretos ligeros con y sin EPS.

Concreto Ligero	
Con EPS	Con otro agregado ligero
La resistencia alcanzada por lo general es baja.	Con agregados ligeros, cuya resistencia sea considerable, se puede conseguir resistencias de 40MPa.
Requiere mayor cantidad de cemento para alcanzar resistencias superiores a 30 Mpa.	Para alcanzar resistencias de 60 Mpa se requiere aumentar la cantidad de cemento superiores de 560 kg/m ³
Se requiere de modulares de viscosidad como la microsilice para evitar problemas de segregación, además el agua no es alterada por la característica hidrofóbica de las partículas de EPS.	Su trabajabilidad es afectada, por el hecho de que el agua es retenida en los poros de los agregados ligeros.
Adquiere una alta resistencia a temperaturas altas como el fuego sin embargo en mayores cantidades eps el concreto comienza a deteriorarse debido a la desintegración de partículas EPS (Sayadi et al., 2016)	No poseen el problema de la desintegración de sus partículas frente al fuego.
Poseen un mejor comportamiento contra los ataques químicos, así como mejores propiedades de durabilidad, debido a su naturaleza inerte.	
Poseen mejor capacidad de disipación de energía	

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

En la tabla 7 se aprecia algunas diferencias entre propiedades de los concretos ligeros con y sin EPS.

2.2.11 EPS como agregado ligero

Es bien sabido y por lo visto en párrafos anteriores que las esferas de poliestireno expandido, comprenden un agregado liviano con un valor de densidad por debajo de 33 kg/m³. Además, en la tabla que sigue, tenemos un cuadro resumen de ventajas del concreto con poliestireno expandido y sus desventajas.

Tabla 8:

Ventajas y desventajas del concreto con EPS.

EPS como agregado ligero	
Ventajas	Desventajas
No absorben agua de la mezcla, esto lo diferencia de otros agregados (hidrofóbico).	Para mantener resistencias adecuadas con baja densidad será de manera difícil pues se sabe que la resistencia aumentará linealmente con la densidad respectiva.
Se puede obtener de manera sencilla y rápida a diferencia de otros agregados.	Respecto a su baja densidad puede ocasionar segregación.
Capaz de resistir mayores cargas axiales, esto sin una desintegración total, debido a su capacidad de absorción de energía.	Se requiere microsílíce para una buena adhesión entre partículas de EPS con la pasta cementante, por ello el tratamiento químico será más caro.

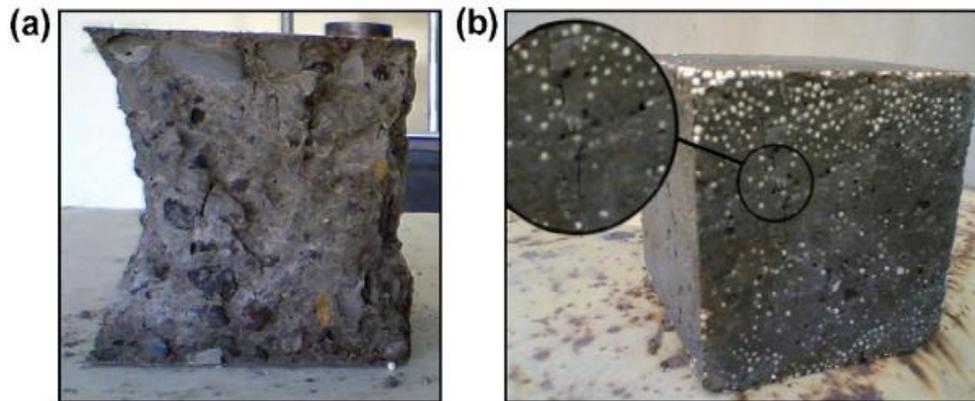
Fuente: Vega More (2019)

En la tabla 8 es posible apreciar lagunas desventajas del concreto ligero con EPS además de sus respectivas ventajas.

Chen & Liu, (2004) en su estudio Propiedades del hormigón ligero de poliestireno expandido reforzado con fibra de acero mencionan que el concreto con EPS puede ser considerado para mitigar vibración pues este estudio afirma que este tipo de concreto ligero con esferas de poliestireno expandido puede ser empleado como una capa protectora para una estructura resistente a cargas de impacto, esto debido a sus buenas características de absorción de energía.

Figura 21:

Modo de falla de un concreto normal (a) y un concreto con EPS (b).



Fuente: Sadrmomtazi et al. (2012)

Se puede distinguir para la figura 21, el modo de falla de un concreto con esferas de poliestireno expandido.

En el presente proyecto se desarrolló un hormigón ligero estructural con valores que varían de 1900 a 2250 kg/m³ (densidad) y con valores que sobrepasan los 210 kg/cm² (resistencia a compresión). Es importante mencionar y como se verá más adelante que en este proyecto se empleó MEPS poliestireno expandido modificado, que, a diferencia de los EPS, los MEPS se someten a calor esto para fines de optimización en propiedades del hormigón como es la resistencia a compresión. A continuación, se dará mayor detalle a las partículas MEPS elaboradas por el equipo de trabajo.

2.2.12 Proceso de fabricación de poliestireno expandido modificado (MEPS)

Como se vio anteriormente, en el día a día las espumas de poliestireno expandido (EPS) tienen muchos usos y son ampliamente usados principalmente como material de embalaje, construcción y electrodomésticos, así como muchos otros. Es importante también mencionar que los residuos de estos materiales en los distintos usos, han ocasionado contaminación ambiental esto debido a que no pueden fácilmente descomponerse en nuestra naturaleza. Además, es importante mencionar que en



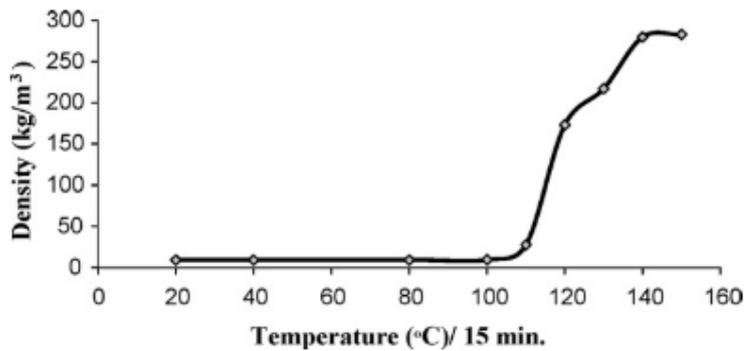
investigaciones previas mencionan el desarrollo de nuevas metodologías en el reciclado de residuos de espumas de poliestireno expandido, como lo es mediante la exposición a temperaturas controladas o tratamiento térmico. Se sabe además que es nuevo proceso, reduce de manera considerable el tamaño (volumen) del EPS hasta un aproximado de entre 15 a 20 veces en comparación a su tamaño de inicio. Estudios además mencionan que la mejor temperatura para un óptimo resultado en la modificación del EPS a MEPS es de 130°C para un periodo de 12 minutos expuesto en calor. Además, se conoce que después de la exposición al calor la conductividad térmica, la densidad y la resistencia a la compresión aumentaron de manera considerable. Y como se mencionó, según bibliografía el nuevo material obtenido se conoce MEPS que es el EPS modificado.

Por otro lado, es bien sabido que los residuos de EPS no se pueden descomponer en la naturaleza, lo que genera muchos problemas ambientales, especialmente la contaminación del agua y la tierra (Kan & Demirboğa, 2008).

Se sabe además que, al someter a calor poliestireno expandido, tiende a transformarse de espuma un estado plástico, además en dicho estudio se pudo presenciar que a temperaturas que son mayores a 130°C durante 15 min, el EPS se espumó. Es conveniente indicar la variación de las densidades en los EPS reciclado, esto para varias temperaturas durante 15 minutos como puede observarse en los gráficos 22 y 23, donde puede notarse el cambio de peso y volumen (%) de las muestras que fueron tratados térmicamente a diferentes temperaturas.

Figura 22:

Cambio de Densidad de EPS reciclado a diferentes temperaturas en horno durante 15 minutos.



Fuente: Kan & Demirboğa (2008)

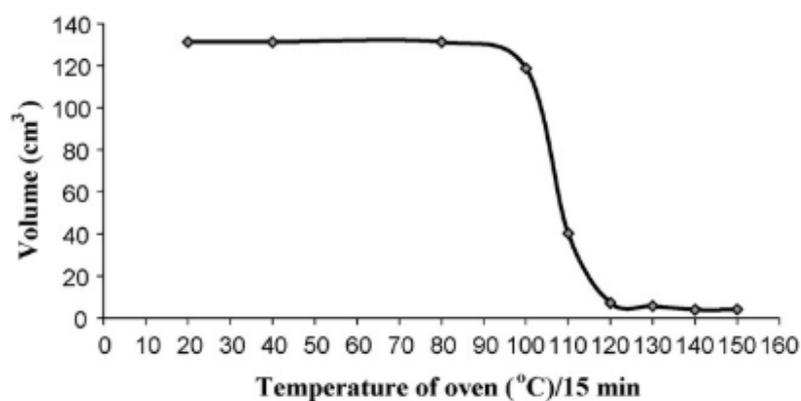
En la figura 22 se puede apreciar los distintos comportamientos de los EPS al ser sometidos a un incremento gradual de temperatura, produciendo un incremento en la densidad.

Concluye además que la variación en el peso de los especímenes se ven afectados al aumentar la temperatura en el tratamiento térmico, notándose que la densidad del EPS se mantuvo casi constante durante 15 min a 100 °C. El cambio de densidad a esta temperatura se muestra en la Figura 14. A partir de esto, se puede ver que la densidad aumenta al aumentar la temperatura, y se observa que a una temperatura de 120°C, hay un mayor aumento en la densidad de EPS después el aumento de la densidad fue más lento. La densidad máxima se obtuvo a 140°C, pero la estructura de los MEPS cambió por completo y los vacíos internos se llenaron con masa fundida. A medida que aumenta la temperatura, la densidad no cambia, o incluso disminuye ligeramente. Después de 130 °C, el aumento de la densidad de MEPS es muy alto. Se concluyó que la temperatura y el tiempo óptimo para obtener la mejor densidad de MEPS fue de 130°C durante 15 minutos. Al aumentar la temperatura se produce una disminución gradual del volumen en todos los niveles de tiempo. En un corto período de tiempo, el aumento de la temperatura da como

resultado una disminución gradual del volumen. Durante 15 minutos, el cambio de volumen es constante debido a la temperatura de 20°C a 80°C. A 100, 110, 120, 130, 140 y 150 °C durante 15 min, el volumen de MEPS se redujo en un 8 %, 66 %, 94 %, 95 %, 97 % y 97 %, respectivamente (Kan & Demirboğa, 2008).

Figura 23:

Cambio de Volumen de EPS reciclado a diferentes temperaturas en horno durante 15 minutos.



Fuente: Kan & Demirboğa (2008)

En la figura 23 se muestra el comportamiento de los EPS al ser sometidos a un incremento gradual de temperatura, produciendo una disminución de su volumen,

En cuanto a la resistencia a la compresión Kan & Demirboğa (2008) concluyen que la resistencia a compresión incrementará con el aumento de la temperatura en todos los niveles expuestos de ésta, menciona por ejemplo que para 130°C, el porcentaje de incremento de dicha resistencia era de 6900% y que después de los 130°C la resistencia a la compresión de MEPS disminuye con el aumento de la temperatura en comparación con el porcentaje de incremento obtenido a los 130°C, concluye que puede deberse a la estructura frágil del MEPS luego de su tratamiento a temperaturas más altas (Kan & Demirboğa, 2008).

MEPS está compuesto por millones de celdas completamente cerradas y de baja porosidad debido a su estructura interna no absorbente. La relación de absorción del grupo MEPS se calculó por métodos gravimétricos y volumétricos en muestras de 4 a 16 mm, y se observó que los valores de absorción de MEPS eran mucho más bajos en comparación con la gran mayoría de los agregados ligeros (LWA). La absorción de agua de los componentes MEPS es del 4,1 % (en peso) y del 0,58 % (en volumen).

Tabla 9:

Tabla comparativa de propiedades entre EPS Y MEPS.

Propiedades	EPS	MEPS
Densidad (kg/m ³)	10	217
Resistencia a la compresión	0.12	8.29
Conductividad Térmica (W/mK)	0.0369	0.0555
Absorción Máxima % por volumen	< 3	0.58

Fuente: Kan & Demirboğa (2008)

2.2.13 Disponibilidad de los MEPS mediante tratamiento térmico

Las perlas de poliestireno expandido EPS, fueron adquiridas para este proyecto de la empresa Tecnopor Distribuidora Iquitos de la ciudad de Lima, para fines de estudio e investigación posteriormente se realizó la exposición a calor para dichas esferas en laboratorio con un horno eléctrico digital.



CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

3.1.1 Tipo de investigación: Analítico

Según (Ruiz, 2006) el presente proyecto de investigación presenta las condiciones para ser del tipo analítico, porque su objetivo principal es comparar diferentes variables entre un grupo de estudio y un grupo de control, buscando causa, naturaleza y efecto. El análisis es la inspección y valoración de hechos específicos. Este enfoque nos permite conocer más sobre el objeto de estudio para que podamos: establecer y explicar analogías, alcanzar mejor el comportamiento y aportar con mejores propuestas (teorías).

3.1.2 Enfoque de investigación: Cuantitativa

Según (Hernández, 2014) el presente proyecto de investigación satisface las condiciones para un tipo de condición metodológica, dependiendo de su método, la investigación cuantitativa, porque a partir de datos cuantitativos y estadísticos, probaremos diferentes hipótesis propuestas para la investigación e inferiremos posibles resultados de nuestra investigación.

El estudio cuantitativo es un método estructurado para el análisis, recopilación de información conseguida de diferentes orígenes, esto vuelve el aplicación de instrumentos computacionales, matemáticas esto con el fin de conseguir resultados, además pretende también la utilización de herramientas estadísticas.

3.1.3 Alcance o niveles de la investigación: Correlacional

Según (Hernández, 2014) el presente proyecto de investigación califica como una encuesta de nivel de correlación porque mide el grado de relación (causalidad) que existe entre las variables a encuestar, determina si están relacionadas y luego analiza la relación.



3.1.4 Tiempo de estudio; transeccionales o transversales

Según (Hernández, 2014) se considerará el tiempo de estudio transversal, porque la recolección de datos será en un solo momento. El propósito es representar este fenómeno descrito y caracterizado por las variables para una situación dada.

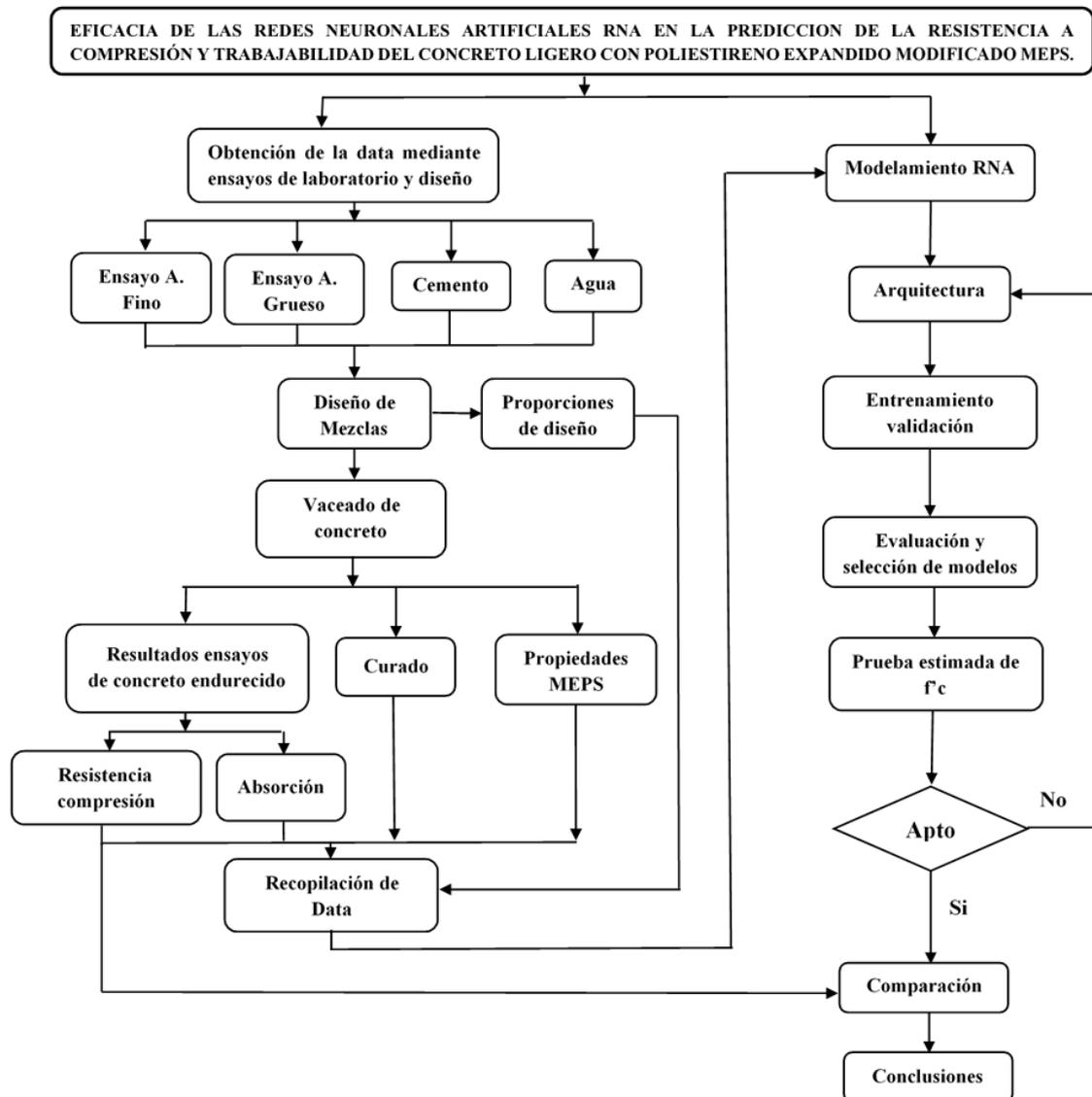
3.1.5 Diseño metodológico de la investigación: Experimental

Como menciona (Hernández, 2014) consideraremos el diseño como cuasi experimental, esto porque al momento de realizar ensayos tanto a los materiales como a las unidades de concreto se presentan agentes externos que son no cuantificables (temperatura del ambiente, humedad, presión atmosférica, calibración de los equipos utilizados para los ensayos, etc.)

3.1.6 Diagrama de flujo

Figura 24:

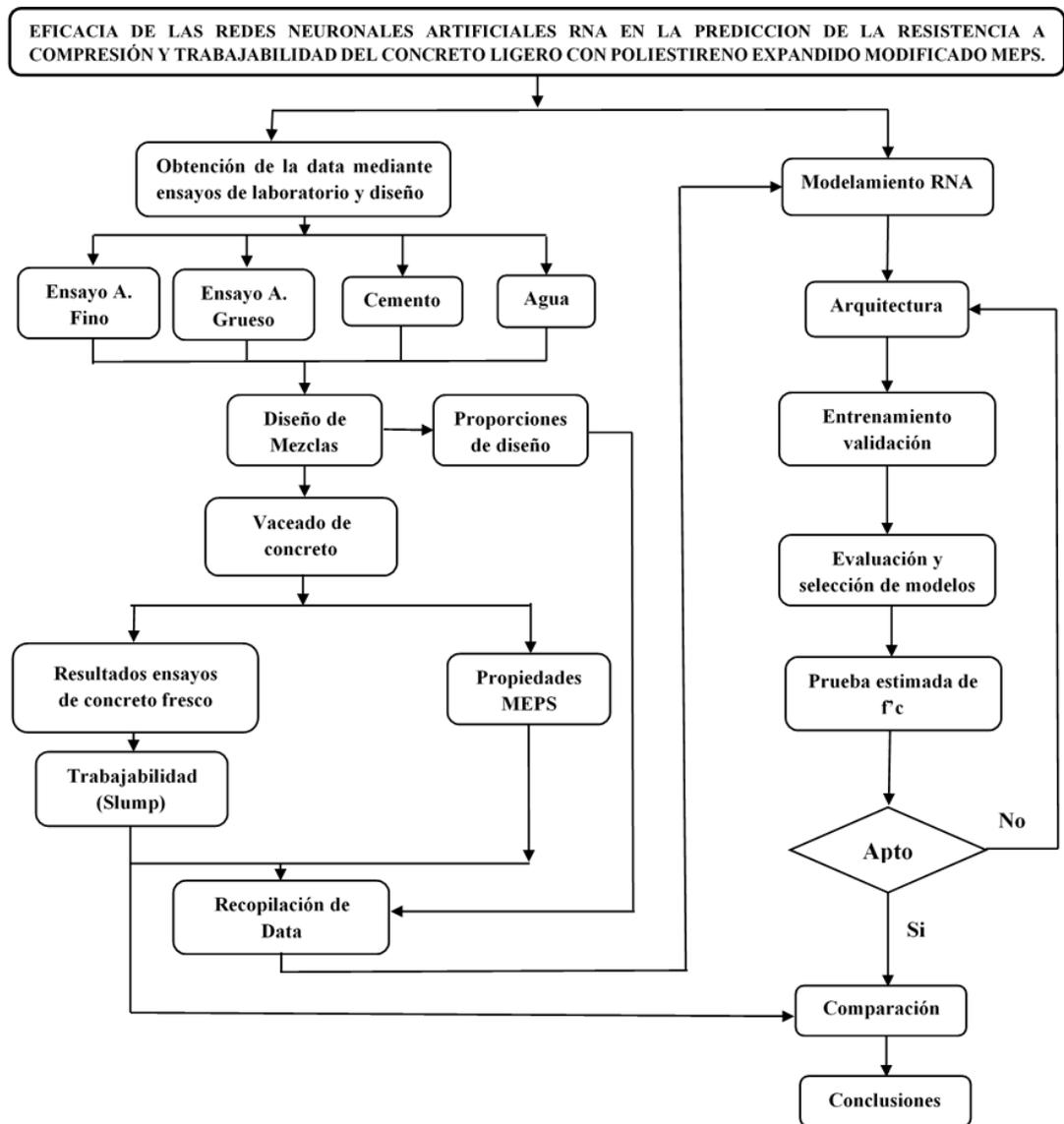
Esquema de flujo de procesos de la RNA en el pronóstico de la resistencia a la compresión.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 25:

Esquema de flujo de procesos de la RNA en el pronóstico de la trabajabilidad (slump).



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

3.2 AMBITO DE ESTUDIO

3.2.1 Geográficas

Los ensayos fueron efectuados en las instalaciones LAIA CONSUL ERIL, dicho laboratorio tiene como ubicación la siguiente:

Tabla 10:

Localización de instalaciones LAIA CONSUL.

LOCALIZACION DE INSTALACIONES LAIA CONSUL		
Localización	Coordenadas geográficas	Coordenadas UTM
Dirección	Urbanización manto	
	Latitud : 15° 51' 57.23" S	Norte : 8245634.42
Distrito	Puno	Este : 391464.21
Provincia	Puno	Altitud : 3882 m.s.n.m.
Región	Puno	

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

En la tabla 10, se muestra la ubicación del laboratorio LAIA CONSUL en la Urbanización Manto 2000 en el distrito de Puno.

Figura 26:

Ubicación de laboratorio LAIA CONSUL.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo



En la figura 26 aprecia la ubicación por Google Maps del laboratorio LAIA CONSUL.

3.2.2 Tiempo de extensión del proyecto de estudio.

La duración del proyecto comprende seis meses correspondientes desde julio a diciembre del 2021.

3.3 POBLACIÓN Y MUESTRA

3.3.1 Población

3.3.1.1 Definición de la población

Este conjunto poblacional está conformado por los grupos de briquetas de concreto elaboradas en circunstancias controladas en laboratorio respecto NTP 339.183. Especificadas a continuación:

- a) Población 1: Conformado por los concretos diseñados para los métodos de: método americano A.C.I, módulo de fineza y el método Stanton Walker, con sustitución por un metro cúbico del volumen de concreto en porcentajes del 5%, 15% y 30% con esferas de poliestireno expandido modificado MEPS a temperaturas de 110°C, 130°C y 145°C para ensayo de concreto fresco trabajabilidad SLUMP.
- b) Población 2: Conformado por probetas (núcleos) de concreto de (10cm X 20cm) para un diseño patrón sin MEPS para los métodos ACI-211, Módulo de fineza y Walker, elaborado con cemento hidráulico en tipo IP, conglomerado fino de los yacimientos de cutimbo y conglomerado grueso (piedra chancada) proveniente de cabanillas cantera de producción de agregados.
- c) Población 3: Conformado por probetas (núcleos) de concreto (10cm X 20cm) con sustitución de MEPS por el método americano A.C.I, Módulo de Fineza



- y Walker para cada temperatura 110°C, 130°C, 145°C con esferas de poliestireno expandido modificado MEPS en porcentajes de 5%, 10%, 15% y 30% de sustitución en volumen a un metro cúbico de concreto, para ensayo normalizado de resistencia a compresión en muestras cilíndricas de concreto.
- d) Población 4: Constituido por probetas (núcleos) de concreto (10cm X 20cm) con sustitución de MEPS por el procedimiento (método) americano A.C.I, Módulo de fineza y método Stanton Walker para cada temperatura 110°C, 130°C, 145°C con esferas de poliestireno expandido modificado MEPS en porcentajes de 5%, 10%, 15% y 30% de sustitución en volumen a una unidad métrica para un cubo de concreto, para ensayo de densidad, absorción y vacíos del concreto endurecido.

3.3.2 Muestra

3.3.2.1 Procedimiento de muestreo

El procedimiento (método) de muestreo utilizado en este estudio toma como base experiencias de investigaciones previas involucrando opiniones y estándares personales de los investigadores.

Para el muestreo se utilizó los criterios de aceptación respecto a los códigos americanos de ACI 318S. En donde se establece que como tamaño de muestra se tendrá:

El código del Comité ACI 318 (2019) menciona:

“Un ensayo de resistencia debe ser el promedio de las resistencias de al menos dos probetas de 150 por 300 mm o de al menos tres probetas de 100 por 200 mm., preparadas de la misma muestra de concreto y ensayadas a 28 días o a la edad de ensayo designada para la determinación de $f'c$ ” . (p.551).

3.3.2.2 Descripción de la muestra

3.3.2.2.1 Muestra para concreto fresco.

La realización de la prueba de revenimiento del concreto se realiza en su fase fresca, para lo cual se tiene un total de muestra de 30 muestras de asentamiento SLUMP la cual se presenta de la siguiente forma:

Tabla 11:

Numero de muestras en el ensayo de revenimiento del concreto con sustitución por MEPS.

Diseño	Temperatura MEPS	% MEPS	Cantidad	Sub Total Por Temperatura	Total por metodo		
ACI	Concreto Normal		1	1	10		
	110	5%	1	3			
		15%	1				
		30%	1				
	130	5%	1	3			
		10%	1				
		15%	1				
	145	5%	1	3			
		10%	1				
		15%	1				
	MF	Concreto Normal		1		1	10
		110	5%	1		3	
15%			1				
30%			1				
130		5%	1	3			
		10%	1				
		15%	1				
145		5%	1	3			
		10%	1				
		15%	1				
WALKER		Concreto Normal		1	1	10	
		110	5%	1	3		
	15%		1				
	30%		1				
	130	5%	1	3			
		10%	1				
		15%	1				



	5%	1	
145	10%	1	3
	15%	1	
TOTAL			30

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

En la tabla 11, se aprecia la distribución de muestras para 3 tipos de diseños estas se encuentran agrupadas y divididas de acuerdo a la temperatura a las que fueron sometidas los MEPS, las cuales sustituirán por un metro cubico de concreto a diferentes porcentajes obteniendo 10 muestras por cada diseño los cuales hacen un total de 30 muestras de asentamiento SLUMP.

3.3.2.2 Muestra para concreto endurecido.

La muestra para esta investigación está conformada por un grupo de briquetas de concreto elaboradas en circunstancias controladas en laboratorio respecto a la NTP 339.183. Organizándose en total de 360 probetas de la siguiente forma:

Tabla 12:

Numero de briquetas fabricadas respecto a los métodos elaborados mencionados, para las mezclas diseñadas planteadas, temperatura y porcentaje de adicción de MEPS.

Diseño	Temperatura MEPS	% MEPS	Días			Sub Total por Porcentaje de MEPS	Sub Total Por Temperatura	Total por método
			7	14	28			
ACI	110	Concreto Normal	4	4	4	12	12	120
		5%	4	4	4	12		
		15%	4	4	4	12		
		30%	4	4	4	12		
	130	5%	4	4	4	12	36	
		10%	4	4	4	12		
		15%	4	4	4	12		
		5%	4	4	4	12		
	145	10%	4	4	4	12	36	
		15%	4	4	4	12		
Concreto Normal		4	4	4	12	12		
MF	Concreto Normal	4	4	4	12	12	120	



		5%	4	4	4	12	
	110	15%	4	4	4	12	36
		30%	4	4	4	12	
		5%	4	4	4	12	
	130	10%	4	4	4	12	36
		15%	4	4	4	12	
		5%	4	4	4	12	
	145	10%	4	4	4	12	36
		15%	4	4	4	12	
	Concreto Normal		4	4	4	12	12
		5%	4	4	4	12	
	110	15%	4	4	4	12	36
		30%	4	4	4	12	
WALKER		5%	4	4	4	12	
	130	10%	4	4	4	12	36
		15%	4	4	4	12	
		5%	4	4	4	12	
	145	10%	4	4	4	12	36
		15%	4	4	4	12	
TOTAL						360	

120

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

En la tabla 12, se puede apreciar la disposición de probetas de concreto, en los ensayos de concreto endurecido, para 3 tipos de diseños estas agrupadas y divididas de acuerdo a la temperatura a las que fueron sometidas los MEPS, las cuales sustituyeron por un metro cubico de concreto a diferentes porcentajes obteniendo 120 probetas por cada diseño, obteniendo un total de 360 núcleos de concreto (briquetas).

El total de probetas fueron utilizadas para los ensayos de concreto endurecido.

3.3.2.2.2.1 Muestras para el ensayo normalizado de resistencia a compresión en concreto endurecido.

Para la determinación del número de muestras para la resistencia a la compresión de concreto, se consideró los criterios de aceptación respecto a los códigos americanos ACI 318S. Para este proyecto de investigación se tomó en consideración el tamaño de muestra de la manera siguiente.

Tamaño de la Muestra:

El código del Comité ACI 318 (2019) establece:

“Un ensayo de resistencia debe ser el promedio de las resistencias de al menos dos probetas de 150 por 300 mm o de al menos tres probetas de 100 por 200 mm., preparadas de la misma muestra de concreto y ensayadas a 28 días o a la edad de ensayo designada para la determinación de $f'c$ ”. (p.551)

Se organizaron en total 270 probetas, con las cuales se determinó la resistencia a la compresión, además estos fueron organizados como se muestra a continuación:

Tabla 13:

Cantidad de probetas cilíndricas de concreto con esferas de poliestireno expandido modificado MEPS para ensayo a la compresión.

Diseño	Temperatura MEPS	% MEPS	Días			Sub Total por Porcentaje de MEPS	Sub Total Por Temperatura	Total por metodo		
			7	14	28					
ACI	110	Concreto Normal	3	3	3	9	9	90		
		5%	3	3	3	9	27			
		15%	3	3	3	9				
	30%	3	3	3	9					
	130	5%	3	3	3	9	27			
		10%	3	3	3	9				
		15%	3	3	3	9				
		145	5%	3	3	3			9	27
			10%	3	3	3			9	
			15%	3	3	3			9	
	MF	110	Concreto Normal	3	3	3	9		9	90
			5%	3	3	3	9		27	
15%			3	3	3	9				
30%		3	3	3	9					
130		5%	3	3	3	9	27			
		10%	3	3	3	9				
		15%	3	3	3	9				
		145	5%	3	3	3		9	27	
			10%	3	3	3		9		
			15%	3	3	3		9		



	Concreto Normal	3	3	3	9	9	
	5%	3	3	3	9		
	15%	3	3	3	9	27	
	30%	3	3	3	9		
WALKER	5%	3	3	3	9		90
	10%	3	3	3	9	27	
	15%	3	3	3	9		
	5%	3	3	3	9		
	10%	3	3	3	9	27	
	15%	3	3	3	9		
TOTAL					270		

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

Podemos notar en la tabla 13 una distribución organizada que se realizó para dicho ensayo normalizado ($f'c$) del concreto, estas agrupadas respecto a 3 tipos de diseño de mezcla estas agrupadas y divididas de acuerdo a la temperatura a la que fueron sometidas los MEPS, las cuales sustituyeron por m^3 de concreto para distintos porcentajes. El número de probetas se obtuvo de acuerdo al mínimo de 3 probetas para probetas de dimensiones de 4"x8" de acuerdo a los 7, 14 y 28 días de curado. Obteniendo 90 probetas de concreto por cada diseño haciendo un total de 270 probetas de concreto.

3.3.2.2.2 Muestras para la densidad, absorción y vacíos del concreto.

Se organizaron un total de 90 probetas para definir la absorción, densidad y a su vez determinar vacíos del concreto y estos fueron organizados de la siguiente forma:

Tabla 14:

Numero de probetas cilíndricas de concreto con esferas de poliestireno expandido modificado MEPS para ensayo de densidad, absorción y vacíos.

Diseño	Temperatura MEPS	% MEPS	Días			Sub Total por Porcentaje de MEPS	Sub Total Por Temperatura	Total por método		
			7	14	28					
ACI	Concreto Normal		1	1	1	3	3	30		
	110	5%	1	1	1	3	9			
		15%	1	1	1	3				
		30%	1	1	1	3				
	130	5%	1	1	1	3	9			
		10%	1	1	1	3				
		15%	1	1	1	3				
	145	5%	1	1	1	3	9			
		10%	1	1	1	3				
		15%	1	1	1	3				
	MF	Concreto Normal		1	1	1	3		3	30
		110	5%	1	1	1	3		9	
15%			1	1	1	3				
30%			1	1	1	3				
130		5%	1	1	1	3	9			
		10%	1	1	1	3				
		15%	1	1	1	3				
145		5%	1	1	1	3	9			
		10%	1	1	1	3				
		15%	1	1	1	3				
WALKER		Concreto Normal		1	1	1	3	3	30	
		110	5%	1	1	1	3	9		
	15%		1	1	1	3				
	30%		1	1	1	3				
	130	5%	1	1	1	3	9			
		10%	1	1	1	3				
		15%	1	1	1	3				
	145	5%	1	1	1	3	9			
		10%	1	1	1	3				
		15%	1	1	1	3				
	TOTAL						90			

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo



Se muestra en la tabla 14, la disposición de probetas de concreto que se hicieron para la determinación de densidad, absorción y vacíos de este tipo de concreto, estas se encuentran agrupadas para los 3 tipos de diseños de mezclas agrupadas y divididas de acuerdo a la temperatura de los MEPS, las cuales sustituyeron por metro cubico de concreto a diferentes porcentajes. Las probetas serán cortadas en 4 partes iguales de las cuales se seleccionarán 2 de ellas para obtener el promedio, de acuerdo a los 7,14 y 28 días de curado. Es por ello que se obtuvo 30 probetas de concreto por cada diseño haciendo un total de 90 probetas de concreto.

3.4 MATERIALES

Los materiales utilizados para la fabricación de este tipo de concreto para el proyecto de investigación desarrollado serán: cemento portland IP, agregado fino y grueso, esferas de poliestireno expandido modificado MEPS. Estos se muestran a continuación.

3.4.1 Cemento portland IP

Respecto al material cementante se opto por el uso de Cemento portland IP de la empresa RUMI que cuenta una densidad (peso específico) de $2.80 \text{ g/cm}^3 - 2.90 \text{ g/cm}^3$. En cumpliendo de la normativa ASTM C5958 además de la Normativa Técnica Peruana 334.090.

3.4.2 Agregado fino

El conglomerado fino optado para el desarrollo del proyecto en la fabricación de este tipo de concreto ligero se consiguió de la cantera cutimbo.

3.4.3 Agregado grueso

Para llevar a cabo este proyecto de investigación el conglomerado grueso fue traído de la cantera de producción de agregados provenientes de Cabanillas “FIMECON S.A.C” dicha empresa procesa este tipo de agregado (piedra chancada uso 57)



3.4.4 Agua

Es proyecto se llevo a cabo usando agua apta para el consumo humano (potable) proveniente de la ciudad de Puno, para la respectiva fabricación de los especímenes de concreto y curado.

3.4.5 Esferas de Poliestireno Expandido Modificado (MEPS)

Para la presente investigación se ha utilizado esferas de poliestireno expandido EPS adquiridos de la empresa distribuidora de planchas de Tecnopor “Distribuidora Iquitos”.

Las perlas de poliestireno expandido fueron sometidas a temperaturas de 110°C, 130°C y 145°C por unos 15 minutos, obteniendo un material que se procedió triturar obteniendo características de gravilla de acuerdo al grado de temperatura al que se ha sometido.

3.5 HERRAMIENTAS INFORMATICAS

3.5.1 Matlab

Para la presente investigación se empleó la plataforma de programación MATLAB con su utilidad Neuronal Network Toolbox.

3.5.2 Excel

Además, se utilizó los comandos y herramientas para el procesamiento de base data y cálculos respectivos de dicho software.

3.6 EQUIPOS

Para el desarrollo y fabricación del concreto ademas de sus ensayos respectivos (estado fresco, endurecido) se utilizaron los siguientes equipos e instrumentos:

- Herramientas manuales (flexómetro, badilejo, cucharón, pala y mazo de goma).
- Juego de tamices.
- Probeta graduada.



- Frasco Volumétrico de 500cm³ de capacidad (Fiola).
- Cono de absorción y pisón para agregado fino.
- Termómetro.
- Balanzas electrónicas.
- Horno Eléctrico.
- Canastilla de malla de alambre.
- Molde metálico para peso unitario suelto y compactado.
- Prensa Hidráulica.
- Bandejas metálica.
- Vernier.
- Mezcladora de concreto de 5p3.
- Moldes de diámetro y altura de 4"x8".
- Varilla compactadora de 3/8".
- Cono de Abrams.
- Platos metálicos y Almohadillas de neopreno
- Cámara fotográfica.

3.7 METODOS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

En cuanto a la obtención de datos, los estudios se han realizado paso a paso y de forma sistemática, utilizando criterios, instrumentos, precisión de trabajo de laboratorio y tratamiento de datos específicos para cada estudio.

La organización de los datos se realizó en tablas de doble entrada. A su vez información ha sido procesada a través de métodos estadísticos adecuados, como los son el error cuadrático medio MSE, el coeficiente de correlación (r) de Pearson y coeficiente de determinación (R Cuadrado).

Además, del respectivo análisis y determinación de las propiedades físico mecánicas en los materiales usados en su fabricación de concreto MEPS, se han ejecutado ensayos de acuerdo con (NTP), Manual de Ensayo de Materiales del MTC, (ASTM), y criterios de aceptación respecto a los códigos americanos ACI 318S.



3.8 TÉCNICAS PARA EL PROCESAMIENTO Y ANALISIS DE INFORMACIÓN

3.8.1 Análisis estadístico.

La obtención de datos durante las pruebas puede variar, dándonos una idea de los respectivos cuidados en los distintos pasos tomados en la preparación de las muestras y la ejecución de ensayos.

Examinando y midiendo podemos distinguir cambios en la conducta para los diferentes objetivos del estudio, estos a demás pertenecerán a las proporciones respectivas para cada muestra y resistencias de diseño óptima para la cantera estudiada.

3.8.2 Análisis de determinación R^2

El R cuadrado proporcionara el pronóstico para los modelos eligiendo el más adecuado, este coeficiente utilizara el criterio mas optimo cuando este se aproxime a 1.

3.8.3 Análisis de correlación lineal R de Pearson

Esta medida de dependencia lineal (r) permite conocer el coeficiente midiendo la relación alguna existente entre dos variables aleatorias cuantitativas y continuas.

A continuación, se muestra el rango de elección de esta medida de dependencia línea (r) con valores comprendidos entre 0 y 1.

- Correlación inexistente con (r) igual a cero
- Correlación muy reducida con valores (r) comprendidos iguales a 0.01 y menores que 0.20.
- Correlación baja con valores (r) comprendidos iguales a 0.21 y menores de 0.40.
- Correlación mesurada con valores (r) comprendidos igual a 0.41 y menores de 0.60.
- Correlación alta con valores (r) comprendidos iguales a 0.61 y menores de 0.80.



- Correlación muy alta con valores (r) comprendidos iguales a 0.81 y menores de 0.99.
- Correlación perfecta con valor de (r) igual a 1

3.8.4 Análisis de varianza (ANOVA) de un solo factor

Para el presente estudio se empleó el método estadístico ANOVA que es utilizado para realizar pruebas de hipótesis en dos a mas medias poblacionales permitiendo así experimentar si dos o mas medias muestrales pertenecen a una misma población para lo cual se tiene en cuenta los siguientes puntos a considerar.

- La prueba propone una hipótesis nula (H_0) mostrando que las medias de las poblaciones (medias de los factores) están considerados de manera igual, mientras que la hipótesis alternativa (H_1) establece lo opuesto, en consecuencia, una es tomada de manera diferente.
- Para los valores que van des de 0.001 hasta el valor de 0.05 adoptando niveles de significancia (α).
- Esto pretende mostrar como resultado un valor (p) que pretende realizar el análisis de la varianza

El valor P se puede interpretar como:

- Si p es mayor α entonces “Se acepta la hipótesis nula (H_0), es decir todas las medias son iguales”.
- Si p es menor α entonces “Se rechaza la hipótesis nula (H_0), y se aceptará la hipótesis alternativa, es decir hubo variación en las medias.”

3.9 METODOLOGÍA METODOS, INSTRUMENTOS Y PROCEDIMIENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.9.1 Obtención del agregado

3.9.1.1 Agregado fino.

En el desarrollo del presente proyecto investigativo en conglomerado fino se consiguió de Cutimbo, este se encuentra localizado a 23.2 km de la vía comprendida entre Puno y Moquegua. Dicha cantera en mención otorga los agregados a las diferentes ciudades del sur incluida Puno, en la elaboración de concretos para obras de edificaciones.

Seguidamente se presenta la ubicación:

Tabla 15:

Ubicación de Cantera.

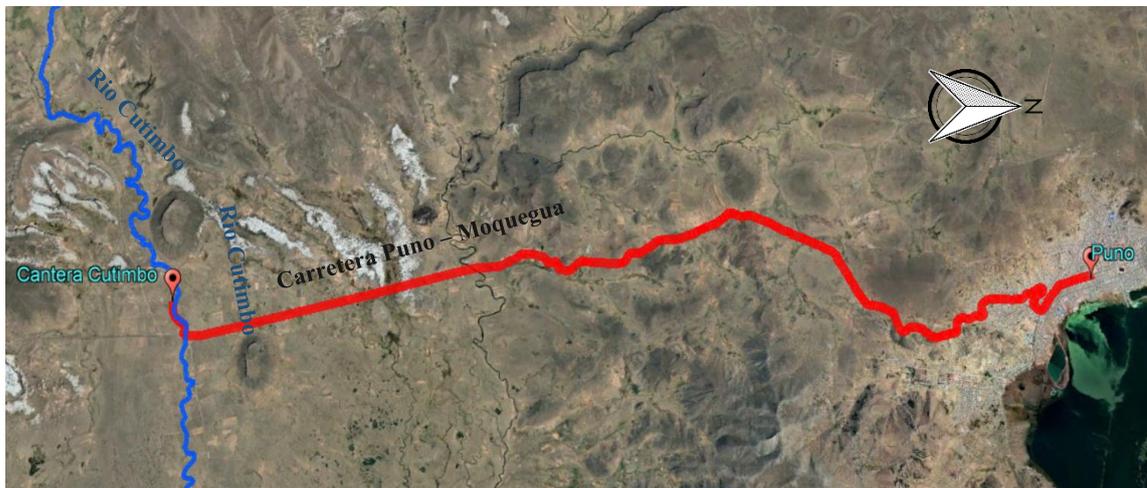
LOCALIZACIÓN DE CANTERA		
Ubicación	Coordenadas geográficas	Coordenadas UTM
Dirección : Cutimbo	Latitud : 16° 02' 20.83" S	Norte : 8226471
Distrito : Pichacani		Este : 391318
Provincia : Puno	Longitud : 70° 00' 57.42" W	Altitud : 3921 m.s.n.m
Región : Puno		

Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo.

En la tabla 15, se muestra la ubicación de la cantera Cutimbo con sus respectivas coordenadas. Cantera de la cual se obtuvo el conglomerado fino para la preparación de concreto en la presente investigación.

Figura 27:

Ubicación de la cantera.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

La figura 27, muestra la ubicación de la cantera Cutimbo y el recorrido desde la ciudad de Puno hasta la cantera por medio de la carretera Puno – Moquegua.

Figura 28:

Obtención del agregado fino.



Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo.

La figura 28, se muestra a la cantera Cutimbo el día que se realizó la extracción del material para obtención del agregado fino.

3.9.1.2 Obtención del agregado grueso

Para la obtención del agregado grueso, se trabajó con la cantera Cutimbo, dándonos un valor en gravedad específica de 2.4 el cual según (Torre, 2004) indica que se puede clasificar en agregados de peso específico normal para valores comprendidos entre 2.5 a 2.75 además la gravedad específica está relacionada con la porosidad cuanto mayor sea su valor más estable y menos porosa será, por ellos se tomó como conveniente tomar la piedra chancada procesada por la empresa “FIMECON S.A.C” provenientes de Cabanillas, cantera de producción de agregados (piedra chancada uso 57), que se encuentra ubicado en el KM 283 de la carretera Juliaca – Cabanillas.

La ubicación de la cantera de producción de agregados FIMECON S.A.C se muestra a continuación:

Tabla 16:

Ubicación de la cantera – piedra chancada.

UBICACIÓN DE CANTERA					
Ubicación		Coordenadas geográficas		Coordenadas UTM	
Dirección	: Yocara	Latitud	: 15° 34' 12.27" S	Norte	: 8278223
Distrito	: Juliaca			Este	: 365303
Provincia	: San Roman	Longitud	: 70° 15' 22.36" W	Altitud	: 3857 m.s.n.m
Región	: Puno				

Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo.

En la tabla 16, se observa la ubicación de la cantera de producción de agregados Piedra chancada con sus respectivas coordenadas. Cantera de la cual se obtuvo el agregado grueso (piedra chancada uso 57) utilizado para la fabricación de concreto en la presente investigación.

Figura 29:

Ubicación de la cantera – piedra chancada.



Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo

La figura 29, muestra la ubicación de la cantera de producción de agregados (Piedra chancada uso 57) y el recorrido desde la ciudad de Juliaca hasta la cantera por medio de la carretera Juliaca – Cabanillas.

Figura 30:

Obtención piedra chancada.



Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo.

La figura 30, se muestra a la cantera de producción de agregados (Piedra chancada uso 57) el día que se realizó la extracción del material para obtención del agregado grueso.

3.9.2 Muestreo para materiales de construcción

Normativa: MTC E201, NTP 400.010, ASTM D75



Establecer procedimientos de muestreo de agregados. Esto es más importante cuando se toman muestras de tamaños apropiados y representativos de todos los materiales recolectados. La muestra tomada para la prueba debe representar en la mayor medida posible el material del que se originó. Para ello, se deben tomar una serie de precauciones, a continuación, enumeramos el estado de los agregados (arena y grava) almacenados en Stock (en forma de pila).

- a) Evite sacar materiales de la misma parte aislada (en algunos casos, la parte inferior de la pila).
- b) Tome muestras de al menos tres partes diferentes de la pila:
 - Cerca del fondo de la pila.
 - Aproximadamente en el medio en la pila.
 - De la parte superior en la pila.

Peso mínimo de muestra

Seguidamente se muestra el peso mínimo de muestra en Kg de acuerdo al tamaño máximo nominal:

Tabla 17:

Peso mínimo de muestra.

Tamaño máximo nominal del agregado	Peso mínimo aproximado para la muestra de campo Kg
Agregado fino	
N° 8	10
N° 4	10
Agregado Grueso	
3/8"	10
1/2"	15
3/4"	25
1"	50
1 1/2"	75
2"	100
2 1/2"	125
3"	150
3 1/2"	175



Fuente: Norma ASTM D-75

En la tabla 17, se observa el cálculo del peso mínimo aproximado en kg de acuerdo al TMN del agregado para la presente investigación para el agregado fino se tomó como TMN de N°4 correspondiente de 10 kg y para el agregado grueso un TMN de 3/4" correspondientes a 50 kg.

Al recoger muestras de agregado, el material debe combinarse, hasta conseguir una muestra homogénea.

El numero a considerar de las muestras estará directamente relacionado y en función del tamaño, homogeneidad de la cantera.

El tamaño de muestra requerido para la prueba depende del tipo de materia prima, las pruebas que se realizaran y el TMN (Tam. Máx. Nom.). Tentativamente, la norma nos proporciona una tabla.

3.9.2.1 Obtención de muestra representativa de agregado para realización de los ensayos.

Este procedimiento consiste en reducir el volumen de la muestra agregada a un volumen más pequeño representativo para obtener un tamaño adecuado para la técnica de análisis.

3.9.2.2 Método de cuarteo

Al preparar una muestra de agregado para concreto, es preciso disminuir el volumen de la muestra de agregado a un volumen de muestra, esta tiene que ser como se indica en la normativa del caso en cuestión.

El propósito de este metodo de obtención de agregado será de hacer dicha muestra representativa al igual que buscar su homogeneidad. El procedimiento paso a paso fue detallado a continuación:

- La muestra se ubica en una área limpia, dura y de condiciones niveladas.

- La muestra se toma de diferentes puntos donde se encuentra acumulado el material a cuartear, apilándola con una pala.
- Se procede a mezclar el conjunto muestral hasta que este constituya una pila (forma de cono) echando repetidamente la muestra desde la base y colocándola hasta la parte superior del cono formado, cayendo de manera homogénea y uniforme mediante los costados de dicha pila cónica.
- Además, se procede a aplanar y extender dicha pila (forma de cono) hacia abajo buscando así extenderla en una forma de base circular con un grosor uniforme
- Se dividirá la muestra en proporciones similares (cuatro), se elegirá cualquiera de las dos muestras opuestas separándolas del resto del conjunto.
- Se procede a repetir el proceso, buscando conseguir una cantidad de muestra requerida para los respectivos ensayos.

Figura 31:

Cuarteo del Material Fino.



Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo

La figura 31, se muestra el cuarteo del material fino.

Figura 32:

Cuarqueo del Material Grueso.



Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo.

La figura 32, se muestra el cuarqueo del material grueso realizado por el equipo de trabajo.

3.9.3 Ensayos para la obtención de las propiedades físicas de los agregados

3.9.3.1 Contenido de humedad

Normativa: MTC E108, NTP 339.185, ASTM C566-19

Es el contenido presente de agua que tiene el agregado en sus estados puestos a intemperie en correspondencia con los respectivos pesos secos muestrales expresadas como porcentaje. Además de esta cantidad de agua depende la relación agua – cemento de la mezcla esta tiene influencia directa con las propiedades del concreto ($f'c$)

a) Equipos e instrumentos

- Balanza con una exactitud de 0.1%.
- Horno eléctrico.
- Taras.

b) Procedimiento:

- Primeramente, se selecciona muestra realizando cuarqueo.

- Luego se toma un recipiente, se codifica y se procede a estimar su peso.
- Se sitúan dichas muestras con humedad en los recipientes pesados.
- Se procede a registrar los pesos para dichas muestras húmedas considerando el peso de los recipientes (tara).
- Se colocaron las muestras húmedas en tara en el horno eléctrico a una temperatura estimada de 110°C por un lapso de tiempo de 24 horas.
- Retirar dichas muestras del horno electrónico y dejar a temperatura ambiente hasta enfriar.
- Por último, peso dichas muestras con tara registrándose estos pesos.

Figura 33:

Muestras para contenido de humedad en conglomerados finos y grueso.



Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo.

La figura 33, se aprecia las muestras tomadas para el contenido de humedad para los agregados.

c) Recolección de datos

Para calcular el contenido de humedad de los agregados se efectuaron dos ensayos con el fin de hacer más fiables los resultados obtenidos mostrados a continuación:

Tabla 18:

Recolección de datos del contenido de humedad agregado fino.

Resultados Contenido de Humedad Agregado Fino		
N° De Prueba	Prueba 1	Prueba 2
Peso de Recipiente (gr.)	53.40	53.60
Peso de Recipiente + M. Humedad (gr.)	615.60	569.70
Peso de Recipiente + M. Seca (gr.)	610.40	564.80
Peso de Agua (gr.)	5.20	4.90
Peso Muestra Seca (gr.)	557.00	511.20

Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo.

En la tabla 18, se muestra el registro de datos para el ensayo de contenido de humedad para el agregado fino para dos pruebas las cuales nos fueron utilizadas para obtener un promedio.

Tabla 19:

Recolección de datos del contenido de humedad agregado Grueso.

Resultados Contenido de Humedad Agregado Grueso		
N° De Prueba	Prueba 1	Prueba 2
Peso de Recipiente + M. Humedad (gr.)	3430.50	3180.60
Peso de Recipiente + M. Seca (gr.)	3401.30	3155.50
Peso de Agua (gr.)	29.20	25.10
Peso Muestra Seca (gr.)	3401.30	3155.50

Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo.

En la tabla 19, se muestra el registro de datos para el ensayo de contenido de humedad para el agregado grueso para dos pruebas las cuales nos fueron utilizadas para obtener un promedio.

d) Cálculos

Con los datos obtenido se realiza el análisis del contenido de humedad en los agregados. Para lo cual se utiliza la expresión:

$$w\% = \frac{W_{H2O}}{W_S} \times 100$$

Donde:



$w\%$: Contenido de humedad.

W_{H20} : Peso húmedo de la muestra.

W_S : Peso seco de la muestra

3.9.3.2 Análisis granulométrico de los agregados gruesos y finos

Normativa: MTC E204, NTP 400.012, ASTM C136

a) Equipos e instrumentos

- Balanzas electrónicas.
- Serie de tamices para agregado grueso
- Serie de tamices para agregado fino
- Recipientes.
- Horno eléctrico a temperatura 110 °C.
- Cepillo metálico.

b) Procedimiento

- Tomamos muestra característica indicada en normativa, mezclando y reduciendo dicha cantidad muestral por el método de cuarteo hasta obtener una muestra de 300gr como mínimo para el material fino, además de 5kg para el material grueso, esto con respecto a un TMN de 3/4" como indica la NTP 400.012.
- A continuación, se lavó dicha muestra, a través del tamiz No. 200 hasta obtener el agua limpia y transparente el material faltante se regresa a dicho tamiz además del material retenido.
- Esta muestra lavada se introdujo al horno eléctrico por un periodo de 1 día con una temperatura de 110°C
- Se registra el peso inicial de los agregados.
- Obtenidas las muestras secadas al horno para dichos agregados estos se proceden a verter en los diferentes y normados tamices a considerar para cada uno conglomerado en cuestión, además se comenzó a agitar los tamices con ligeros movimientos constantes buscando llegar a pesos constantes para cada uno respectivamente.
- Por último, se procedió a pesar los pesos retenidos en cada uno de los tamices con ayuda de una balanza de precisión.

Figura 34:

Análisis granulométrico agregado fino.



Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo

La figura 34, se aprecia la realización del ensayo de análisis granulométrico de agregado fino de acuerdo al orden de los tamices para el agregado fino.

Figura 35:

Análisis granulométrico agregado grueso.



Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo

La figura 35, se aprecia la ejecución del ensayo de análisis granulométrico de agregado grueso de acuerdo al orden de los tamices para el agregado grueso.

Tabla 20:

Recolección de datos de análisis granulométrico agregado fino.

Análisis granulométrico agregado fino		
Peso de La Muestra Representativa (gr)		513.80 gr.
TAMICES	ABERTURA	PESO
ASTM	mm	RETENIDO
No4	4.760	1.10
No8	2.380	108.80
No16	1.190	86.70
No30	0.590	89.50
No50	0.300	142.50
No100	0.149	72.40
No200	0.074	11.10
Peso Retenido en la Base		0.90

Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo.

En la tabla 20, se muestra el registro de datos para el ensayo granulométrico del agregado fino, en los cuales se anotó el peso retenido por cada una de los tamices.

Tabla 21:

Recolección de datos de análisis granulométrico agregado grueso.

Análisis granulométrico agregado grueso		
Peso de La Muestra Representativa (gr)		5302 gr.
TAMICES	ABERTURA	PESO
ASTM	mm	RETENIDO
2"	50.600	
1 1/2"	38.100	
1"	25.400	
3/4"	19.050	809.30
1/2"	12.700	2177.60
3/8"	9.525	1113.60
No4	4.760	1124.00
No8	2.380	18.90



Peso Retenido en la Base 45.00

Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo.

En la tabla 21, se muestra el registro de datos para el ensayo granulométrico del agregado grueso, en los cuales se anotó el peso retenido por cada una de los tamices.

c) Cálculos

Con los datos recogidos se realizó el análisis granulométrico para los agregados para lo cual se utilizó las siguientes expresiones:

Peso corregido

$$Peso\ Corregido = Peso\ Retenido + \frac{Desperdicio}{N^{\circ}\ de\ mallas}$$

Porcentaje retenido

$$\% Retenido = \frac{Porcentaje\ corregido \times 100}{Peso\ inicial}$$

Porcentaje retenido acumulado

$$\% Retenido\ Acumulado = \%R(i) + \%R(i + 1)$$

Porcentaje que pasa

$$\% Pasa = \%Retenido\ Acumulado - 100$$

3.9.3.3 Módulo de fineza de los agregados gruesos y finos

Teniendo los pesos que se retuvieron en las mallas normadas por el ensayo granulométrico se procede al cálculo de los módulos de fineza, este se calculó por la sumatoria en porcentajes retenidos de los valores acumulados esto para las series de mallas ya mencionadas dividiéndose entre 100.

a) Cálculos

Con los datos obtenidos se desarrolló el cálculo del módulo de fineza de los agregados de acuerdo a las siguientes expresiones:

Módulo de fineza del Agregado Fino – Cantera Cutimbo

Tabla 22:

Recolección de datos de porcentaje de retenidos acumulados por cada malla agregado fino.

Análisis Granulométrico del Agregado Fino				
Tamices ASTM	Abertura mm	Peso Retenido	% Retenido parcial	% Retenido acumulado
3/8"	9.525			
No4	4.760	1.10	0.21	0.21
No8	2.380	108.80	21.21	21.42
No16	1.190	86.70	16.90	38.32
No30	0.590	89.50	17.45	55.77
No50	0.300	142.50	27.78	83.55
No100	0.149	72.40	14.11	97.66
No200	0.074	11.10	2.16	99.82
	Base	0.90	0.18	100.00
	Total	513.00	100.00	
	% Perdida	0.16		

Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo.

En la tabla 22, se muestra el procesamiento de los pesos retenidos en porcentajes como son el retenido parcia y retenido acumulado los cuales fueron utilizados en el cálculo del módulo de fineza del agregado fino como se muestra a seguidamente.

$$mf = \frac{(0.21 + 21.42 + 38.32 + 55.7 + 83.55 + 97.66)}{100}$$

$$mf = 2.97$$

Módulo de fineza del Agregado Grueso – piedra chancada de Cabanillas.

Tabla 23:

Recolección de datos de porcentaje de retenidos acumulados por cada malla agregado grueso.

Análisis Granulométrico del Agregado Grueso Huso # 57				
Tamices ASTM	Abertura mm	Peso Retenido	% Retenido parcial	% Retenido acumulado
2"	50.600			
1 1/2"	38.100			
1"	25.400			



3/4"	19.050	809.30	15.30	15.30
1/2"	12.700	2177.60	41.18	56.48
3/8"	9.525	1113.60	21.06	77.54
No4	4.760	1124.00	21.25	98.79
No8	2.380	18.90	0.36	99.15
Base		45.00	0.85	100.00
Total		5288.40	100.00	
% Perdida		0.26	100.00	

Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo.

En la tabla 23, se muestra el procesamiento de los pesos retenidos en porcentajes como son el retenido parcia y retenido acumulado los cuales fueron utilizados en el cálculo del módulo de fineza del agregado grueso como se muestra a seguidamente.

$$mg = \frac{(15.30 + 77.54 + 98.79 + 99.15 + 100 + 100 + 100 + 100)}{100}$$
$$mg = 6.91$$

3.9.3.4 Peso específico y absorción de los agregados finos

Normas: MTC E205, NTP 400.022, ASTM C128

a) Equipos e Instrumentos

- Balanzas electrónica.
- Fiola de capacidad de 500cm³.
- Molde cónico metálico.
- Varilla para apisonado metálica.
- Secadora de aire caliente.
- Recipientes metálicos
- Cucharones
- Pipeta
- Horno eléctrico digita.



b) Procedimiento

- La muestra característica tomada se mezcla y se redujo completamente por el método de cuarteo manual hasta obtener aproximadamente 1kg, la cual se seca en el horno digital a 110°C (temperatura constante)
- A continuación, sumergimos la muestra característica en un recipiente acompañado con agua saturándose por un día (24 hrs.) luego se vertió el agua excedente procurando evitar perder material fino.
- Para obtener el estado considerado superficialmente seco SSS de la muestra de material fino extendiendo la muestra sobre un área plana removiéndolo continuamente hasta obtener un secado parejo, hacer este procedimiento hasta obtener dicho estado SSS.
- Se realiza la prueba del estado superficialmente seco (SSS), colocando el conjunto muestral en el molde cónico normado cónico esto hasta rebasar el cono y buscar compactar con el pisón un estimado de 25 golpes.
- Se limpio el agregado suelto esparcido en la base procediendo a levantar el cono verticalmente, comprobando así la existencia de humedad superficial en el material fino esto para el caso de que conserve su forma, si se notara una ligera caída de la materia fina este es un indicativo de que se obtenido el estado saturado superficialmente seco SSS.
- Una vez se llegó a obtener el estado buscado SSS (saturado considerado superfinamente seco), se peso 500gr., estos se introdujeron en el picnómetro, a continuación, se llenó con agua aproximadamente hasta un 90% de su capacidad.
- Se comienza a agitar el picnómetro para retirar el aire atrapado utilizando métodos manuales como es el girado del picnómetro en una superficie previamente nivelada revestida con una franela y sometiéndola en un recipiente a una

temperatura controlada, seguidamente se procede a completar el agua hasta la marca de la picnómetro.

- Se pesa el picnómetro lleno hasta su marca y se procede a ser pesada.
- Se retira el agregado y agua contenida en el picnómetro y se deposita en una tara para luego ser secada en un horno a temperatura constante (110°C con un rango de variación de $\pm 5^{\circ}\text{C}$ por periodo de 24 horas).
- Una vez transcurrido el tiempo se retira del horno y se determina el peso del agregado seco.

Figura 36:

Obtención del estado SSS del agrega del agregado fino.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

La figura 36, se aprecia la obtención del estado saturado superficialmente seco (SSS) para el agregado fino.

Figura 37:

Procedimiento para la determinación del peso específico del agregado fino.



Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo

La figura 37, se aprecia el procedimiento para la determinación del peso específico del agregado fino, utilizando una fiola hasta una capacidad determinada por la fiola la cual fue sometida a baño maría con una temperatura de $25^{\circ}\text{C} \pm 2$.

c) Toma de datos

Se realizaron 2 pruebas, para una mayor seguridad de los resultados conseguidos.

Tabla 24:

Registro de datos para gravedad específica y absorción.

Gravedad específica y absorción agregado fino		
N° de Prueba	Prueba I	Prueba II
Peso de la muestra saturada y superficialmente seca (SSS) (gr.)	500.2	500.0
Peso del picnómetro + peso del agua (gr.)	690.3	691.2
Peso de picnómetro con agua + muestra sss (gr.)	991.8	993.2
Peso del recipiente (gr.)	92.7	85.8
Peso del recipiente + muestra secada al horno (gr.)	579.5	572.8
Peso de la muestra secada al horno (gr.)	486.8	487.1

Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo.

En la tabla 24, se muestra el registro de datos para el cálculo de la gravedad específica y absorción del agregado fino para lo cual se realizó dos pruebas para obtener el promedio.



d) Cálculos

Con los datos obtenidos se desarrolló el cálculo de la gravedad específica y el porcentaje de absorción para lo cual se utilizó las siguientes expresiones:

Peso específico aparente

$$Ge_a = \frac{A}{(B + S - C)}$$

Peso específico aparente (S.S.S)

$$Ge_{SSS} = \frac{S}{(B + S - C)}$$

Porcentaje de absorción

$$\% \text{ de Absorción} = \left(\frac{S - A}{A} \right) \times 100$$

Donde:

A: Peso seo de la muestra al horno.

B: Peso del picnómetro con agua

C: Peso del picnómetro con agua mas muestra.

S: Peso de la muestra saturado superficialmente seca.

3.9.3.5 Peso específico y absorción de los agregados gruesos

Norma: MTC E206, NTP 400.021, ASTM C127

a) Equipos e Instrumentos

- Balanza sensibilidad a 0.5g equipada con dispositivo para suspender la muestra.
- Canastilla de malla de alambre.
- Depósito de agua.
- Franelas de tela para secado de muestra
- Recipientes
- Horno con temperatura constante de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.

b) Procedimiento

- Se toma una muestra característica, se mezcla y se redujo completamente por el método del cuarteo manual hasta obtener 3 kg de acuerdo a la NTP 400.021, la cual es sometida a calor temperatura constante 110°C con rango de variación $\pm 5^\circ\text{C}$ en un recipiente.
- El conjunto muestral es sometido con agua en un recipiente saturándose por tiempo de 24 horas.
- Se extrae la muestra saturada, y se procede al secado con un trapo absorbente, hasta hacer que desaparezca la capa de agua visible, evitando la evaporación del secado de la superficie del agregado obteniendo el estado saturado superficialmente seco (SSS).
- Se procede a pesar el conjunto muestral (SSS) buscando colocarse de manera inmediata en la canasta que se encuentra previamente sumergida, además se procede a registrar este peso sumergido en agua con temperatura constante aproximada de 23°C con una variación límite de $\pm 2^\circ\text{C}$.
- Se procede a retirar el agregado de la canasta y se coloca en una bandeja para luego ser esta secada en horno electrónico digital con una temperatura que oscila los 110°C con variación de $\pm 5^\circ\text{C}$ por un estimado aproximado de 24 horas, luego se pesa el agregado cuando la temperatura sea cómodo al tacto.

Figura 38:

Obtención del estado SSS del agrega del agregado grueso.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

La figura 38, se aprecia la obtención del estado saturado superficialmente seco (SSS) para el agregado grueso.

Figura 39:

Procedimiento para la determinación del peso específico del agregado grueso.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

La figura 39, se aprecia el procedimiento para obtener el peso específico del agregado grueso, un sistema sumergido a través de una canastilla.

c) Toma de datos

Se realizaron 2 pruebas, para una mayor seguridad de los resultados conseguidos.

Tabla 25:

Recolección de datos para gravedad específica y absorción.

Gravedad específica y absorción agregado grueso		
N° de Prueba	Prueba I	Prueba II
Peso de la muestra secada al horno (gr.)	3418.4	3363.6
Peso de la muestra saturada superficialmente seca (gr.)	3487.8	3434.8
Peso de la canastilla sumergida (gr.)	168.3	167.6
Peso de la canastilla sumergida + muestra SSS sumergida (gr.)	2285.1	2257.6
Peso de la muestra saturada superficialmente seca sumergida en agua (gr.)	2116.8	2090.0

Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo.

En la tabla 25, se muestra el registro de datos para el cálculo de la gravedad específica y absorción del agregado grueso.



d) Cálculos

Con los datos obtenidos se desarrolló el cálculo de la gravedad específica y el porcentaje de absorción para lo cual se utilizó las siguientes expresiones:

Peso específico aparente

$$Ge_a = \frac{A}{(S - C)}$$

Peso específico aparente (S.S.S)

$$Ge_{SSS} = \frac{S}{(S - C)}$$

Porcentaje de absorción

$$\% \text{ de Absorción} = \left(\frac{S - A}{A} \right) \times 100$$

Donde:

A: Peso seo de la muestra al horno.

S: Peso de la muestra saturado superficialmente seca (SSS).

C: Peso en el agua de la muestra saturada

3.9.3.6 Peso unitario y porcentaje de vacíos de los agregados

Norma: MTC E203, ASTM C29.

a) Equipos e Instrumentos

- Balanzas con acercamiento de 0.1%.
- Varilla de acero de 5/8”.
- Molde Cilíndrico.
- Recipientes de volúmenes adecuados.
- Cucharón.

b) Procedimiento

- **Peso Unitario Suelto Seco (PUSS)**

- Se selecciona un molde cilíndrico que tenga las dimensiones adecuadas recomendadas para la realización del ensayo, luego se toma el peso y dimensiones para determinar el volumen.
- Seleccionar una muestra representativa por cuarteo.
- Se vierte la muestra en el molde cilíndrico de una altura no mayor a 2" hasta rebosar el recipiente.
- Una vez se encuentre rebosando el molde se procede al enrasado utilizando la varilla
- Se procede al pesado del molde con el contenido de la muestra en una balanza con acercamiento de 0.05 kg.
- El procedimiento se repitió 3 veces para tener un valor promedio.

Figura 40:

Colocado de muestra en molde para ensayo de PUSS agregado fino.



Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo

La figura 40, se aprecia el colocado de la muestra en el molde para la realización del ensayo de peso específico unitario suelto seco PUSS del agregado fino.

Figura 41:

Colocado de muestra en molde para ensayo de PUSS agregado grueso.



Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo

La figura 41, se aprecia el colocado de la muestra en el molde para la realización del ensayo de peso específico unitario suelto seco PUSS del agregado grueso.

➤ **Peso Unitario Compactado Seco (PUCS)**

- Se selecciona un molde cilíndrico que tenga las dimensiones adecuadas recomendadas para la realización del ensayo, luego se toma el peso y dimensiones para determinar el volumen.
- Obtener muestra representativa por cuarteo.
- El agregado se colocó en un recipiente en tres capas, apisonando en cada una de las capas del agregado con 25 golpes con la varilla de 5/8" distribuidos de forma uniforme en cada capa, evitando golpear el fondo del molde, atravesando la varilla la capa inferior.
- Una vez se encuentre rebosando el molde se procede al enrasado utilizando la varilla.
- Se procede al pesado del molde con el contenido de la muestra en una balanza con acercamiento de 0.05 kg.

- Este procedimiento se repitió 3 veces para tener un valor promedio.

Figura 42:

Llenado de muestra en molde para ensayo PUCS agregado fino.



Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo

La figura 42, se aprecia el llenado de la muestra en el molde para la realización del ensayo de peso específico unitario compactado seco PUCS del agregado fino

Figura 43:

Colocado de muestra en molde para ensayo de PUCS agregado grueso.



Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo

La figura 43, se aprecia la realización del ensayo de peso específico unitario compactado seco PUCS del agregado grueso.



c) Recolección de datos

Se realizaron 3 pruebas, para una mayor seguridad de los resultados conseguidos.

- **Recolección de datos peso unitario y porcentaje de vacíos del agregado fino**

Tabla 26:

Recolección de datos de peso unitario suelto agregado fino.

Peso unitario suelto agregado fino			
Identificador	Prueba I	Prueba II	Prueba III
Peso del molde (gr.)	8486.00	8486.00	8486.00
Peso del molde + muestra suelta (gr.)	13295.00	13296.00	13281.00
Peso de la muestra (gr.)	4809.00	4810.00	4795.00
Volumen de molde (cm ³)	3058.99	3058.99	3058.99

Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo.

En la tabla 26, se muestra el registro de datos para el cálculo de peso unitario suelto de agregado fino para lo cual se realizó dos pruebas para obtener el promedio.

Tabla 27:

Recolección de datos de peso unitario compactado agregado fino.

Peso unitario compactado agregado fino			
Identificador	Prueba I	Prueba II	Prueba III
Peso del molde (gr.)	8486.00	8486.00	8486.00
Peso del molde + muestra suelta (gr.)	13471.00	13471.00	13473.00
Peso de la muestra (gr.)	4985.00	4985.00	4987.00
Volumen de molde (cm ³)	3058.99	3058.99	3058.99

Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo.

En la tabla 27, se muestra el registro de datos para el cálculo de peso unitario compactado de agregado fino para lo cual se realizó dos pruebas para obtener el promedio.

- **Recolección de datos peso unitario y porcentaje de vacíos del agregado grueso**

Tabla 28:

Recolección de datos de peso unitario suelto agregado grueso.

Recolección de datos de peso unitario suelto agregado grueso			
Identificador	Prueba I	Prueba II	Prueba III
Peso del molde (gr.)	8486.00	8486.00	8486.00
Peso del molde + muestra suelta (gr.)	12804.00	12747.00	12775.00
Peso de la muestra (gr.)	4318.00	4261.00	4289.00
Volumen de molde (cm ³)	3058.99	3058.99	3058.99

Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo.

En la tabla 28, se muestra el registro de datos para el cálculo de peso unitario suelto de agregado grueso para lo cual se realizó dos pruebas para obtener el promedio.

Tabla 29:

Recolección de datos de peso unitario compactado agregado fino.

Recolección de datos de peso unitario compactado agregado grueso			
Identificador	Prueba I	Prueba II	Prueba III
Peso del molde (gr.)	8486.00	8486.00	8486.00
Peso del molde + muestra suelta (gr.)	13206.00	13226.00	13246.00
Peso de la muestra (gr.)	4720.00	4740.00	4760.00
Volumen de molde (cm ³)	3058.99	3058.99	3058.99

Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo.

En la tabla 29, se muestra el registro de datos para el cálculo de peso unitario compactado de agregado grueso para lo cual se realizó dos pruebas para obtener el promedio.

d) Cálculos

Con los datos obtenidos se desarrolló el cálculo peso unitario suelto y compactado para lo cual se utilizó las siguientes expresiones:

Peso unitario compactado seco (PUCS)

$$PUCS = \frac{\text{Peso del agregado fino compactado}}{\text{Volumen del molde}}$$

Peso unitario suelto seco (PUSS)

$$PUSS = \frac{\text{Peso del agregado fino suelto}}{\text{Volumen del molde}}$$

3.9.4 Estudio para la elaboración y determinación de las propiedades de las esferas de poliestireno expandido modificado (MEPS)

3.9.4.1 Elaboración de las esferas de poliestireno expandido modificado (MEPS)

Para la presente investigación se utilizó esferas de poliestireno expandido EPS de baja densidad, con un diámetro promedio de 1.5-3.5mm obtenidas de la “Distribuidora Iquitos”.

Figura 44:

Esferas de poliestireno expandido modificado EPS.



Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo

La figura 44, se muestra las esferas de poliestireno expandidas EPS utilizadas para la elaboración de MEPS.

Las perlas de poliestireno expandido (EPS) fueron expuestas a temperaturas de 110°C, 130°C y 145°C en un horno por unos 15 minutos, con este proceso se obtiene las

esferas de poliestireno expandido modificado (MEPS), cuya estructura es quebradiza y dura, reduciendo su volumen y notándose un aumento de su densidad.

Figura 45:

Esferas de poliestireno expandido EPS en el horno antes de la exposición a temperatura.



Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo

La figura 45, se muestra las esferas de poliestireno expandidas EPS previo a ser sometidas a temperatura de 130 °C.

Figura 46:

Esferas de poliestireno expandido EPS en el horno luego de la exposición a temperatura.



Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo



La figura 46, se muestra las esfera de poliestireno expandido EPS después de haber sido sometidas a temperatura de 130 °C obteniendo esferas de poliestireno expandido modificado MEPS.

3.9.4.2 Análisis granulométrico de las esferas de poliestireno expandido modificado (MEPS)

El análisis granulométrico de las partículas de esferas de poliestireno expandido modificado (MEPS) sometidas a temperaturas de 110°C, 130°C y 145°C. Para obtener la distribución de sus partículas y su diámetro promedio que nos ayudara para alimentar a la red neuronal artificial.

a) Equipos e instrumentos

- Balanzas con acercamiento de 0.1%.
- Serie de tamices serie fina: Nro. 4, Nro. 8, Nro. 16, Nro. 30, Nro. 50 base y tapa.
- Recipientes Metálicos
- Brocha
- Espátula

b) Procedimiento

- Se obtiene una muestra de las esferas de poliestireno expandido modificado (MEPS) que fueron sometidas a temperaturas de 110°C, 130°C y 145°C. Para las temperaturas de 110°C y 130°C se tomó como muestra de 50 gr y para las de temperatura de 145°C se tomó 100gr.
- Una vez pesado se vertió las esferas de poliestireno expandido modificado (MEPS) en el juego de tamices y se comenzó a agitar los tamices con ligeros movimientos constates.
- Por último, se procedió a pesar los pesos retenidos en cada uno de los tamices con ayuda de una balanza de precisión.

Figura 47:

Análisis granulométrico de las esferas de poliestireno expandido modificado MEPS.



Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo

La figura 47, se muestra el análisis granulométrico para las esferas de MEPS a una temperatura de 145 °C para cada uno de los tamices.

Seguidamente, se muestra la obtención de los registros para el análisis granulométrico para los MEPS en las diferentes temperaturas 110°C, 130°C y 145°C.

Tabla 30:

Recolección de datos de análisis granulométrico MEPS Temperatura 110°C.

Análisis granulométrico MEPS Temperatura 110°C		
Tamices ASTM	Abertura mm	Peso Retenido
No4	4.760	1.51
No8	2.380	44.26
No16	1.190	4.16
Peso Retenido Base		0.00

Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo.

En la tabla 30, se muestra la recolección de datos para del análisis granulométrico de MEPS para una temperatura de 110°C, en los cuales se anotó el peso retenido por cada uno de los tamices.

Tabla 31:

Recolección de datos de análisis granulométrico MEPS Temperatura 130°C.

Análisis granulométrico MEPS Temperatura 130°C		
Tamices ASTM	Abertura mm	Peso Retenido
No4	4.760	1.39
No8	2.380	41.03
No16	1.190	7.55
Peso Retenido Base		0.00

Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo.

En la tabla 31, se muestra la recolección de datos para del análisis granulométrico de MEPS para una temperatura de 130°C, en los cuales se anotó el peso retenido por cada uno de los tamices.

Tabla 32:

Recolección de datos de análisis granulométrico MEPS Temperatura 145°C.

Análisis granulométrico MEPS Temperatura 145°C		
Tamices ASTM	Abertura mm	Peso Retenido
No4	4.760	1.32
No8	2.380	30.64
No16	1.190	67.66
No30	0.590	0.30
No50	0.300	0.04
Peso Retenido Base		0.00

Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo.

En la tabla 32, se muestra la recolección de datos para del análisis granulométrico de MEPS para una temperatura de 145°C, en los cuales se anotó el peso retenido por cada uno de los tamices.

c) Cálculos



$$\text{Peso Corregido} = \text{Peso Retenido} + \frac{\text{Desperdicio}}{\text{N}^\circ \text{ de mallas}}$$

Porcentaje retenido

$$\% \text{ Retenido} = \frac{\text{Porcentaje corregido} \times 100}{\text{Peso inicial}}$$

Porcentaje retenido acumulado

$$\% \text{ Retenido Acumulado} = \%R(i) + \%R(i + 1)$$

Porcentaje que pasa

$$\% \text{ Pasa} = \% \text{ Retenido Acumulado} - 100$$

3.9.4.3 Diámetro promedio de (MEPS)

El diámetro promedio se obtiene a partir de la granulometría de los MEPS. Para lo cual se calcula realizando una interpolación entre las mallas que presenten el 50% de retenido acumulado.

3.9.4.3.1 Diámetro promedio de MEPS sometido a temperatura de 110°C

Tabla 33:

Recolección de datos de porcentaje de retenidos acumulados por cada malla MEPS Temperatura 110°C.

Análisis granulométrico MEPS Temperatura 110°C					
Tamices ASTM	Abertura mm	Peso Retenido	% Retenido parcial	% Retenido acumulado	% Que pasa
No4	4.760	1.51	3.02	3.02	96.98
No8	2.380	44.26	88.64	91.67	8.33
No16	1.190	4.16	8.33	100.00	0.00
Base		0.00	1.09	100.00	0.00
Total		49.93	100.00		
Perdida		0.07			

Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo.

En la tabla 33, se muestra el procesamiento de los pesos retenidos en porcentajes como los son el retenido parcial, acumulado y porcentaje que pasa. Para el cálculo del

diámetro promedio de MEPS a 110°C se obtuvo del 50% de retenido acumulado en contraendose entre los tamices No4 y No8.

$$\left[\begin{array}{cc} 4.76 & 3.02 \\ \left[\begin{array}{cc} \emptyset_{prom} & 50.00 \end{array} \right] \\ 2.38 & 91.67 \end{array} \right]$$

Se interpola para hallar el diámetro promedio:

$$\frac{4.76 - 2.38}{\emptyset_{prom} - 2.38} = \frac{3.02 - 91.67}{50 - 91.67}$$

Despejando \emptyset_{prom} se obtiene:

$$\emptyset_{prom} = 3.50 \text{ mm}$$

3.9.4.3.2 Diámetro promedio de MEPS sometido a temperatura de 130°C

Tabla 34:

*Recolección de datos de porcentaje de retenidos acumulados por cada malla MEPS
Temperatura 130°C.*

Análisis granulométrico MEPS Temperatura 130°C					
Tamices ASTM	Abertura mm	Peso Retenido	% Retenido parcial	% Retenido acumulado	% Que pasa
No4	4.760	1.39	2.78	2.78	97.22
No8	2.380	41.03	82.11	84.89	15.11
No16	1.190	7.55	15.11	100.00	0.00
	Base	0.00	1.09	100.00	0.00
	Total	49.97	100.00		
	Perdida	0.03			

Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo.

En la tabla 34, se muestra el procesamiento de los pesos retenidos en porcentajes como los son el retenido parcial, acumulado y porcentaje que pasa. Para el cálculo del

diámetro promedio de MEPS a 130°C se obtuvo del 50% de retenido acumulado en
contraendose entre los tamices No4 y No8.

$$\left[\begin{array}{cc} 4.76 & 2.78 \\ \left[\begin{array}{cc} \emptyset_{prom} & 50.00 \end{array} \right] \\ 2.38 & 84.89 \end{array} \right]$$

Se interpola para hallar el diámetro promedio:

$$\frac{4.76 - 2.38}{\emptyset_{prom} - 2.38} = \frac{2.78 - 84.89}{50 - 84.89}$$

Despejando \emptyset_{prom} se obtiene:

$$\emptyset_{prom} = 3.39 \text{ mm}$$

3.9.4.3.3 Diámetro promedio de MEPS sometido a temperatura de 145°C

Tabla 35:

Recolección de datos de porcentaje de retenidos acumulados por cada malla MEPS

Temperatura 145°C.

Análisis granulométrico MEPS Temperatura 145°C					
Tamices ASTM	Abertura mm	Peso Retenido	% Retenido parcial	% Retenido acumulado	% Que pasa
No4	4.760	1.32	1.32	1.32	98.68
No8	2.380	30.64	30.65	31.97	68.03
No16	1.190	67.66	67.69	99.66	0.34
No30	0.590	0.30	0.30	99.96	0.04
No50	0.300	0.04	0.04	100.00	0.00
Base		0.00	1.09	100.00	0.00
Total		99.96	100.00		
Perdida		0.04			

Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo.

En la tabla 35, se muestra el procesamiento de los pesos retenidos en porcentajes como los son el retenido parcial, acumulado y porcentaje que pasa. Para el cálculo del diámetro promedio de MEPS a 145°C se obtuvo del 50% de retenido acumulado en contraendose entre los tamices No8 y No16.

$$\left[\begin{array}{cc} 2.38 & 31.97 \\ \left[\begin{array}{cc} \emptyset_{prom} & 50.00 \end{array} \right] \\ 1.19 & 99.66 \end{array} \right]$$

Se interpola para hallar el diámetro promedio:

$$\frac{2.38 - 1.19}{\emptyset_{prom} - 1.19} = \frac{31.97 - 99.66}{50 - 99.66}$$

Despejando \emptyset_{prom} se obtiene:

$$\emptyset_{prom} = 2.06 \text{ mm}$$

3.9.4.4 Densidad de las esferas de poliestireno expandido modificado (MEPS)

Para la presente investigación se calculó la densidad de las esferas de poliestireno expandido modificado utilizando el principio de Arquímedes, que especifica que todo cuerpo sumergido total o parcialmente en un fluido recibe un empuje ascendente, igual al peso del fluido desalojado por el objeto.

a) Equipos e instrumentos

- Balanzas con acercamiento de 0.1%.
- Probeta 1000ml.
- Pesa patrón 500gr.

b) Procedimiento

- Se ha creado un sistema en el cual este compuesto por un compartimento para el llenado de esferas de poliestireno expandido y se cuelga una pesa patrón de 500gr.

- Se pesa el sistema al aire con la ayuda de la balanza el cual se denominará el parámetro A.
- Luego se sumergió el sistema en una probeta con agua y se determinó el peso sumergido del sistema el cual denominaremos el parámetro B.
- Seguidamente se pesan las esferas de poliestireno expando modificado (MEPS) y se denomina un parámetro C. Y se colocan dentro del compartimento del sistema y se procede al peso del sistema más los MEPS el cual se denomina un parámetro D.
- Se sumergió el sistema más los MEPS y se determinó el peso sumergido del sistema el cual se denominará un parámetro E.

Figura 48:

Proceso de toma de datos para el cálculo de la densidad de los MEPS.



Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo

La figura 48, se muestra el sistema en equilibrio para el cálculo de la densidad de las esferas de poliestireno expandido modificado MEPS.

c) Toma de datos

Se realizaron 3 pruebas para determinar la densidad de las esferas de poliestireno expandido modificado (MEPS) sometidas a temperatura de 110°C, 130°C y 145°C, las cuales nos darán una mayor certeza de resultados.

Tabla 36:

Recolección de datos de densidad de esferas de poliestireno expandido modificado

MEPS para una temperatura de 110°C.

Densidad MEPS Temperatura 110°C			
N° de Prueba	Prueba I	Prueba II	Prueba III
Peso del sistema (gr) [A]	624.60	624.60	624.60
Peso del sistema sumergido (gr) [B]	539.60	539.60	539.60
Peso de los MEPS (gr) [C]	1.20	1.30	1.20
Peso del sistema con MEPS (gr) [D]	625.80	625.90	625.80
Peso del sistema con MEPS sumergido (gr) [E]	572.70	576.00	572.10

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 36, se muestra la recolección para el cálculo de la densidad de los MEPS con temperatura de 110°C.

Tabla 37:

Recolección de datos de densidad de esferas de poliestireno expandido modificado

MEPS para una temperatura de 130°C.

Densidad MEPS Temperatura 130°C			
N° de Prueba	Prueba I	Prueba II	Prueba III
Peso del sistema (gr) [A]	624.60	624.60	624.60
Peso del sistema sumergido (gr) [B]	539.60	539.60	539.60
Peso de los MEPS (gr) [C]	4.10	4.60	4.20
Peso del sistema con MEPS (gr) [D]	628.70	629.20	628.80
Peso del sistema con MEPS sumergido (gr) [E]	575.50	575.90	574.60

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 37, se muestra la recolección para el cálculo de la densidad de los MEPS con temperatura de 130°C.



Tabla 38:

Recolección de datos de densidad de esferas de poliestireno expandido modificado

MEPS para una temperatura de 145°C.

Densidad MEPS Temperatura 145°C			
N° de Prueba	Prueba I	Prueba II	Prueba III
Peso del sistema (gr) [A]	624.60	624.60	624.60
Peso del sistema sumergido (gr) [B]	539.60	539.60	539.60
Peso de los MEPS (gr) [C]	6.70	7.30	7.20
Peso del sistema con MEPS (gr) [D]	631.30	631.90	631.80
Peso del sistema con MEPS sumergido (gr) [E]	578.00	579.00	579.30

Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo

En la tabla 38, se muestra la recolección para el cálculo de la densidad de los MEPS con temperatura de 145°C.

d) Cálculos

Se procedió al cálculo de la densidad de las esferas de poliestireno expandido modificado (MEPS) sometidas a temperaturas de 110°C, 130°C y 145°C.

Empuje del sistema

$$E_s = (A - B) \times g$$

Volumen del sistema

$$V_s = \frac{E_s}{\rho \cdot g}$$

Empuje del sistema con esferas de poliestireno expandido modificado MEPS

$$E_{S_MEP} = (D - E) \times g$$

Volumen del sistema con esferas de poliestireno expandido modificado MEPS

$$V_{S_MEP} = \frac{E_{S_MEP}}{\rho \cdot g}$$

Volumen de las esferas de poliestireno expandido modificado MEPS

$$V_{MEPS} = V_s - V_{S_MEP}$$

Densidad de las esferas de poliestireno expandido modificado MEPS



$$\rho_{MEPS} = \frac{C}{V_{MEPS}}$$

Donde:

E_s : Empuje del sistema.

V_s : Volumen del sistema.

E_{S_MEP} : Empuje del sistema con MEPS.

V_{S_MEP} : Volumen del sistema con MEPS.

V_{MEPS} : Volumen de MEPS.

ρ_{MEPS} : Densidad de los MEPS.

3.9.5 Diseño de mezclas de concreto

Una vez realizado cada uno de los respectivos ensayos ya mencionados, determinando las propiedades del concreto, se procede a combinar en proporciones convenientes, para la elaboración de concretos con un valor de resistencia a compresión ($f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$) por un tiempo de curado de 28 días.

El diseño de mezclas se obtuvo mediante los métodos ACI 211, Modulo de Fineza y WALKER, enfocándonos en la obtención de las proporciones adecuadas para elaborar concreto ligero adicionando esferas de poliestireno expandido modificado MEPS a temperaturas 110°C , 130°C y 145°C , en porcentajes de 5%, 10%, 15% y 30% en volumen de concreto.

3.9.5.1 Materiales

3.9.5.1.1 Materiales cementantes.

Para la investigación actual, se utilizó cemento Portland IP marca RUMI.

3.9.5.1.2 Agregados

El material fino usado en el presente estudio se obtuvo de cutimbo y para el material grueso este se obtuvo material piedra chancada uso 57; material que fue

procesado por la cantera de producción de agregados de la empresa “FIMECON S.A.C”
lugar cabanillas.

Tabla 39:

Propiedades de los agregados.

Descripción	Agregado Fino	Agregado Grueso
Tamaño Máximo	N° 4	1"
Tamaño Máximo Nominal	-	3/4"
Peso Específico (gr/cm ³)	2.52	2.55
Peso Específico Suelto (kg/m ³)	1570	1400
Peso Específico Compactado (kg/m ³)	1630	1550
Contenido de Humedad (%)	0.95	0.83
Absorción (%)	2.70	2.10
Modulo de Fineza	2.97	6.91

Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo.

En la tabla 39, se muestra el resultado las propiedades obtenidas de los ensayos de laboratorio de los agregados.

3.9.5.1.3 Agua

Para la presente investigación se empleado agua potable de la Ciudad de Puno

3.9.5.2 Diseño de mezclas de concreto patrón $f'c210$ kg/cm²

3.9.5.2.1 Método ACI

3.9.5.2.1.1 Cálculo de la Resistencia Promedio Requerida ($f'cr$)

Se calculo la resistencia promedio de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 40:

Resistencia del concreto a la compresión promedio requerida.

$f'c$	$f'cr$
menos de 210	$f'c + 70$
210 a 350	$f'c + 84$
sobre 350	$f'c + 98$

Fuente: ACI-Comité 211

En la tabla 40, se seleccionó la resistencia a compresión promedio respecto a la resistencia a la compresión que se dese obtener.

Para una resistencia a compresión de 210 kg/cm², se considera un factor de 84 kg/cm², obteniendo una resistencia promedio de 294 kg/cm².

3.9.5.2.1.2 Tamaño Máximo y Máximo Nominal del Agregado Grueso

El Tamaño máximo y Tamaño máximo nominal seleccionados para la presente investigación fueron obtenidos respecto a la normativa NTP 400.037 (2018) los cuales son:

Tamaño Máximo : 1”

Tamaño Máximo Nominal : 3/4”

3.9.5.2.1.3 Selección del Asentamiento

Tabla 41:

Para Concretos bombeables.

Consistencia	Asentamiento
Seca	0" a 2"
Plástica	3" a 4"
Fluida	Mayor igual a 5"

Fuente: Abanto (2009)

En la tabla 41, se puede ver el tipo de asentamiento de acuerdo a la consistencia que se seleccione.

Se ha seleccionado una consistencia plástica correspondiente a un asentamiento de 3” – 4”, para poder garantizar la trabajabilidad cuando se le añada los MEPS.

3.9.5.2.1.4 Volumen Unitario de Agua

Para obtener el volumen unitario de agua se ha usado la tabla establecida por el ACI 211:

Tabla 42:

Volumen unitario de agua para el tamaño nominal máximo y los valores de asentamiento.

Asentamiento	Agua en Lts/m ³ , para los tamaños máximos nominales de agregado y consistencia indicados							
	3/8 "	1/2 "	3/4 "	1 "	1 1/2 "	2 "	3 "	6 "
Concretos sin aire incorporado								
1" a 2"	207	199	190	179	166	154	130	113
3" a 4"	228	216	205	193	181	169	145	124
6" a 7"	243	228	216	202	190	178	160	---

Fuente: ACI-Comité 211

En la tabla 42, se puede ver los volúmenes unitarios de agua los cuales serán seleccionados de acuerdo al tamaño máximo y los valores de asentamiento por lo tanto para nuestro tipo de diseño se obtendría un volumen unitario de **205 l/m³**, correspondiente a un TMN de 3/4" y un asentamiento de 3-4".

3.9.5.2.1.5 Selección del Contenido de Aire

Tabla 43:

Porcentaje de aire atrapado para diferentes valores de Tamaño Máximo Nominal.

Tamaño Máximo Nominal	Aire Atrapado
3/8 "	3.0 %
1/2 "	2.5 %
3/4 "	2.0 %
1 "	1.5 %
1 1/2 "	1.0 %
2 "	0.5 %
3 "	0.3 %
6 "	0.2 %

Fuente: ACI-Comité 211

En la tabla 43, se puede ver los diferentes porcentajes de aire atrapado de acuerdo a los diferentes tamaños máximos nominales.

Por lo que para un TMN de 3/4" se obtiene un 2% de aire atrapado.

3.9.5.2.1.6 Selección de la Relación Agua/Cemento (a/c) por Resistencia.

Tabla 44:

Relación agua-cemento por resistencia.

f' cr (28 días)	Relación a/c de diseño en peso	
	Concretos sin aire incorporado	Concretos con aire incorporado
150	0.80	0.71
200	0.70	0.61
250	0.62	0.53
300	0.55	0.46
350	0.48	0.40
400	0.43	---
450	0.38	---

Fuente: ACI-Comité 211

En la tabla 44, se muestra la relación agua cemento en función de la resistencia promedio fcr.

Seleccionamos la relación agua cemento según la resistencia de $f'_{cr}=294 \text{ kg/cm}^2$ para un concreto sin aire incorporado. Se obtuvo una interpolación entre el límite obteniendo la relación agua - cemento de la siguiente manera:

f'cr	a/c
250	0.62
294	X
300	0.55

Interpolando se obtuvo la relación a/c:

$$\frac{300 - 250}{300 - 294} = \frac{0.55 - 0.62}{0.55 - X}$$

Despejando se tiene:



$$X = 0.56$$

Entonces tenemos:

$$a/c = 0.56$$

3.9.5.2.1.7 Factor Cemento

El factor cemento obtuvo de la división del volumen unitario agua sobre la relación agua/cemento:

$$FC = \frac{\text{Volumen Unitario de agua}}{\text{Relacion a/c}} = \frac{205 \text{ l/m}^3}{0.56} = 366.07 \text{ kg/m}^3$$

$$FC = 366.07 \text{ kg/m}^3$$

$$FC = \frac{366.07 \text{ kg/m}^3}{42.5 \text{ kg}}$$

$$FC = 8.6 \text{ bolsas/m}^3$$

3.9.5.2.1.8 Selección del Contenido de Agregado Grueso

Tabla 45:

Volumen de Agregado Grueso por Unidad de Volumen de Concreto.

Tamaño máximo nominal del agregado grueso	Volumen de agregado grueso, seco y compactado por unidad de volumen de concreto, para diferentes módulos de fineza de agregado fino			
	MODULO DE FINEZA DEL AGREGADO FINO			
	2.4	2.6	2.8	3
3/8 "	0.50	0.48	0.46	0.44
1/2 "	0.59	0.57	0.55	0.53
3/4 "	0.66	0.64	0.62	0.60
1 "	0.71	0.69	0.67	0.65
1 1/2 "	0.76	0.74	0.72	0.70
2 "	0.78	0.76	0.74	0.72
3 "	0.81	0.79	0.77	0.75
6 "	0.87	0.85	0.84	0.81

Fuente: ACI-Comité 211

En la tabla 45, se puede ver la determinación del contenido de volumen de agregado grueso que se encontrará respecto al tamaño nominal máximo del agregado grueso y el módulo de finura del agregado fino.

Como nuestro TMN es de 3/4" y un MF del agregado fino de 2.97 obtenemos de la tabla 45 el volumen seco y compactado del agregado grueso que se encuentra entre los siguientes rangos para su cálculo se debe de interpolar entre los máximos y mínimos:

2.8	2.97	3
0.62	X	0.6

Se interpola los valores para hallar el volumen seco y compactado del agregado grueso:

$$\frac{3 - 2.97}{3 - 2.80} = \frac{0.60 - X}{0.60 - 0.62}$$

Despejando se obtiene:

$$X = 0.60$$

Obteniendo un volumen seco y compactado del agregado grueso:

$$b/b_o = 0.60m^3$$

Por lo tanto, con un MF de 2.97 y un TMN de 3/4", se encuentra un valor de b/b_o de 0.60 m³ de agregado grueso seco y compactado por unidad de volumen de concreto. Además, se conoce el peso unitario seco y compactado del agregado grueso, que es de 1550 kg/m³, entonces se puede calcular la cantidad de agregado grueso en kg, mediante la siguiente expresión:

$$\left[\begin{array}{l} \text{Cantidad de} \\ \text{Ag. Grueso (kg)} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{Volumen de} \\ \text{Ag. Grueso de la tabla} \end{array} \right] \times \left[\begin{array}{l} \text{Peso Unitario seco} \\ \text{y compactado del} \\ \text{Ag Grueso en kg/m}^3 \end{array} \right]$$



$$\left[\begin{array}{l} \text{Cantidad de} \\ \text{Ag. Grueso (kg)} \end{array} \right] = 0.60m^3 \times 1550 \text{ kg/m}^3$$

$$\left[\begin{array}{l} \text{Cantidad de} \\ \text{Ag. Grueso (kg)} \end{array} \right] = 930.00 \text{ kg}$$

3.9.5.2.1.9 Cálculo de los Volúmenes Absolutos

Conocidos los pesos de los ingredientes cemento, agua y agregado grueso, como también el volumen de aire, se calcula la suma de volúmenes absolutos de estos ingredientes:

Volúmenes absolutos de los ingredientes:

$$\text{Cemento} = \frac{\text{Factor Cemento}}{\text{P. e. del cemento}} = \frac{366.07 \text{ kg}}{2850 \text{ kg/m}^3} = 0.128 \text{ m}^3$$

$$\text{Agua} = \frac{\text{Vol. unitario de agua}}{\text{P. e. del agua}} = \frac{205 \text{ l}}{1000 \text{ l/m}^3} = 0.205 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire} = \% \text{ de aire atrapado} = 2 \% = 0.020 \text{ m}^3$$

$$\begin{aligned} \text{Agregado grueso} &= \frac{\text{Peso A. g. Seco y compactado}}{\text{P. e. del Agregado grueso}} = \frac{930 \text{ kg}}{2550 \text{ kg/m}^3} \\ &= 0.365 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Sumatoria de volúmenes absolutos conocidos:

Cemento	0.128 m ³
Agua	0.205 m ³
Aire	0.020 m ³
A. Grueso	0.365 m ³
<hr/> Sub Total	<hr/> 0.718 m ³



3.9.5.2.1.10 Contenido de Agregado Fino

Para calcular el volumen absoluto del agregado fino, se resta de la unidad con la suma de los volúmenes absolutos conocidos. De esta forma podemos encontrar el peso del agregado fino multiplicando el volumen absoluto por su peso específico.

$$\text{Volumen A. Fino} = 1 - 0.718 = 0.282 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen A. Fino} = 0.282 \text{ m}^3$$

$$\text{Peso A. Fino} = (\text{Volumen A. Fino}) \times (p.e. \text{ A. Fino})$$

$$\text{Peso A. Fino} = 0.282 \times (2.52 \times 1000) \text{ kg}$$

$$\text{Peso A. Fino} = 710.26 \text{ kg}$$

3.9.5.2.1.11 Valores de Diseño

Las cantidades de materiales calculados como valores de diseño fueron:

Cemento : 366.07 kg

Agua de diseño : 205.00 lt

Agregado Fino Seco : 710.26 kg

Agregado Grueso Seco : 930.00 kg

3.9.5.2.1.12 Corrección por Humedad del Agregado

Una vez obtenido los valores de diseño estos se encuentran en proporciones secas, es por ello que se tiene que realizar una corrección en función de las condiciones de humedad del agregado fino y grueso, con el fin de obtener los valores reales a ser utilizados en el concreto en obra.

Pesos húmedos:

$$\text{A. Fino} : (\text{Peso seco}) \times (1 + w\%) \text{ kg/m}^3 = (710.26) \times (1 + 0.95/100)$$

$$\text{A. Grueso} : (\text{Peso seco}) \times (1 + w\%) \text{ kg/m}^3 = (930.00) \times (1 + 0.83/100)$$

$$\text{A. Fino} : 717.00 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{A. Grueso} : 937.72 \text{ kg/m}^3$$



Humedad superficial del agregado:

A. Fino : $Conenido\ de\ humedad - absorcion = 0.83 - 2.10 = -1.27\%$

A. Grueso : $Conenido\ de\ humedad - absorcion = 0.95 - 2.70 = 1.75\%$

Aporte de humedad:

A. Fino : $(Peso\ seco) \times (humedad)\ lt/m^3 = (710.26) \times \left(-\frac{1.27}{100}\right)$

A. Grueso : $(Peso\ seco) \times (humedad)\ lt/m^3 = (930.00) \times \left(-\frac{1.75}{100}\right)$

A. Fino : $-12.43\ lt/m^3$

A. Grueso : $-11.81\ lt/m^3$

Total : $-24.24\ lt/m^3$

Agua efectiva:

Agua efectiva = $205.00 - Aporte\ humedad\ (lt/m^3)$

Agua efectiva = $205.00 - (-24.24) = 229.24\ lt/m^3$

Agua efectiva = $229.24\ lt/m^3$

Pesos corregidos:

Cemento : $366.07\ kg/m^3$

Agua efectiva : $229.24\ lt/m^3$

Agregado fino húmedo : $717.00\ kg/m^3$

Agregado grueso húmedo : $937.72\ kg/m^3$

3.9.5.2.1.13 Proporciones de la Mezcla

Culminado el diseño paso a paso y obtenidas las dosificaciones, se calculó en peso todos los materiales necesarios para una tanda de concreto.

La proporción en pesos húmedos resultó:

$$\frac{366.07}{366.07} : \frac{717.00}{366.07} : \frac{937.72}{366.07} / \frac{229.24}{42.5}$$

1 : 1.96 : 2.56 / 26.61 lt/bolsa

3.9.5.2.2 Método Módulo de Fineza

3.9.5.2.2.1 Cálculo de la Resistencia Promedio Requerida (f'_{cr})

Se calculo la resistencia promedio de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 46:

Resistencia del concreto a la compresión promedio requerida.

f'_c	f'_{cr}
menos de 210	$f'_c + 70$
210 a 350	$f'_c + 84$
sobre 350	$f'_c + 98$

Fuente: ACI-Comité 211

En la tabla 46, se seleccionó la resistencia a compresión promedio respecto a la resistencia a la compresión que se dese obtener.

Para una resistencia a compresión de 210 kg/cm², se considera un factor de 84 kg/cm², obteniendo una resistencia promedio de 294 kg/cm².

3.9.5.2.2.2 Tamaño Máximo y Máximo Nominal del Agregado Grueso

El Tamaño máximo y Tamaño máximo nominal seleccionados para la presente investigación fueron obtenidos respecto a la normativa NTP 400.037 (2018) los cuales son:

Tamaño Máximo : 1”

Tamaño Máximo Nominal : 3/4”

3.9.5.2.2.3 Selección del Asentamiento

Tabla 47:

Para Concretos bombeables.

Consistencia	Asentamiento
Seca	0" a 2"
Plástica	3" a 4"
Fluida	Mayor igual a 5"

Fuente: Abanto (2009)

En la tabla 47, se muestra el tipo de asentamiento de acuerdo a la consistencia que se seleccione.

Se ha seleccionado una consistencia plástica correspondiente a un asentamiento de 3" – 4", para poder garantizar la trabajabilidad cuando se le añade los MEPS.

3.9.5.2.2.4 Volumen Unitario de Agua

Para obtener el volumen unitario de agua se ha usado la tabla establecida por el ACI 211:

Tabla 48:

Volumen unitario de agua para el tamaño nominal máximo y los valores de asentamiento.

Asentamiento	Agua en Lts/m ³ , para los tamaños máximos nominales de agregado y consistencia indicados							
	3/8 "	1/2 "	3/4 "	1 "	1 1/2 "	2 "	3 "	6 "
Concretos sin aire incorporado								
1" a 2"	207	199	190	179	166	154	130	113
3" a 4"	228	216	205	193	181	169	145	124
6" a 7"	243	228	216	202	190	178	160	---

Fuente: ACI-Comité 211

En la tabla 48, se puede ver los volúmenes unitarios de agua los cuales serán seleccionados de acuerdo al tamaño máximo y los valores de asentamiento por lo tanto

para nuestro tipo de diseño se obtendría un volumen unitario de **205 l/m³**, correspondiente a un TMN de 3/4" y un asentamiento de 3-4".

3.9.5.2.2.5 Selección del Contenido de Aire.

Tabla 49:

Porcentaje de aire atrapado para diferentes valores de Tamaño Máximo Nominal.

Tamaño Máximo Nominal	Aire Atrapado
3/8 "	3.0 %
1/2 "	2.5 %
3/4 "	2.0 %
1 "	1.5 %
1 1/2 "	1.0 %
2 "	0.5 %
3 "	0.3 %
6 "	0.2 %

Fuente: ACI-Comité 211

En la tabla 49, se puede ver los diferentes porcentajes de aire atrapado de acuerdo a los diferentes tamaños máximos nominales.

Por lo que para un TMN de 3/4" se obtiene un 2% de aire atrapado.

3.9.5.2.2.6 Selección de la Relación Agua/Cemento (a/c) por Resistencia.

Tabla 50:

Relación agua-cemento por resistencia.

f ' cr (28 días)	Relación a/c de diseño en peso	
	Concretos sin aire incorporado	Concretos con aire incorporado
150	0.80	0.71
200	0.70	0.61
250	0.62	0.53
300	0.55	0.46
350	0.48	0.40
400	0.43	---
450	0.38	---

Fuente: ACI-Comité 211

En la tabla 50, se muestra la relación agua cemento en función de la resistencia promedio f_{cr} .

Seleccionamos la relación agua cemento según la resistencia de $f'_{cr}=294 \text{ kg/cm}^2$ para un concreto sin aire incorporado. Se obtuvo una interpolación entre el límite obteniendo la relación agua - cemento de la siguiente manera:

f_{cr}	a/c
250	0.62
294	X
300	0.55

Interpolando se obtuvo la relación a/c:

$$\frac{300 - 250}{300 - 294} = \frac{0.55 - 0.62}{0.55 - X}$$

Despejando se tiene:

$$X = 0.56$$

Entonces tenemos:

$$a/c = 0.56$$

3.9.5.2.2.7 Factor Cemento.

El factor cemento obtuvo de la división del volumen unitario agua sobre la relación agua/cemento:

$$FC = \frac{\text{Volumen Unitario de agua}}{\text{Relacion a/c}} = \frac{205 \text{ l/m}^3}{0.56} = 366.07 \text{ kg/m}^3$$

$$FC = 366.07 \text{ kg/m}^3$$



$$FC = \frac{366.07 \text{ kg/m}^3}{42.5 \text{ kg}}$$

$$FC = 8.6 \text{ bolsas/m}^3$$

3.9.5.2.2.8 Cálculo del Volumen Absoluto de la Pasta.

$$\text{Cemento} = \frac{\text{Factor cemento}}{\text{P. e. del cemento}} = \frac{366.07 \text{ kg}}{2850 \text{ kg/m}^3} = 0.128 \text{ m}^3$$

$$\text{Agua} = \frac{\text{Vol. unitario de agua}}{\text{P. e. del agua}} = \frac{205 \text{ l}}{1000 \text{ l/m}^3} = 0.205 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire} = \% \text{ de aire atrapado} = 2\% = 0.020 \text{ m}^3$$

Por lo tanto:

Cemento	: 0.128 m ³
Agua	: 0.205 m ³
Aire	: 0.020 m ³
<hr/>	
Volumen Abs de la pasta	0.353 m ³

3.9.5.2.2.9 Volumen Absoluto del Agregado

El volumen absoluto del agregado se calcula de la diferencia entre el 100% respecto al volumen absoluto de la pasta.

$$\text{Volumen absoluto del agregado} = 1 - 0.353$$

$$\text{Volumen absoluto del agregado} = 0.647$$

3.9.5.2.2.10 Módulo de fineza de la combinación de agregados

Tabla 51:

Módulo de fineza de la combinación de agregados.

Tamaño máximo nominal del agregado grueso	Módulo de fineza de la combinación de agregados que da las mejores condiciones de trabajabilidad para los contenidos de cemento en sacos/m ³ indicados			
	6	7	8	9
3/8 "	3.96	4.04	4.11	4.19
1/2 "	4.46	4.54	4.61	4.69
3/4 "	4.96	5.04	5.11	5.19
1 "	5.26	5.34	5.41	5.49
1 1/2 "	5.56	5.64	5.71	5.79
2 "	5.86	5.94	6.01	6.09
3 "	6.16	6.24	6.31	6.39

Fuente: Rivva (2000)

En la tabla 51, se muestra la obtención del Mf de la combinación de agregados en respecto del TMN del agregado grueso y el factor cemento en sacos.

	┌──────────────────┐	
8	8.6	9
5.11	X	5.19
	└──────────────────┘	

Se interpola los valores para hallar el Mf de la combinación de agregados

$$\frac{9 - 8.6}{9 - 8} = \frac{5.19 - X}{5.19 - 5.11}$$

Despejando se obtiene:

$$X = 5.16$$

Obteniendo:

$$m = X = 5.16$$

Porcentaje del agregado fino

Se determinó el porcentaje de agregado fino en relación al volumen absoluto total de agregado. Para ello se aplicó la siguiente ecuación:



$$r_f = \frac{m_g - m}{m_g - m_f} \times 100$$

Donde:

m: Módulo de fineza de la combinación de agregados (TABLA 03)

mg: Módulo de fineza del agregado grueso

mf: Módulo de fineza del agregado fino

$$r_f = \frac{6.91 - 5.16}{6.91 - 2.97} \times 100$$

$$r_f = 44.4\%$$

Por lo tanto

$$\% \text{ A. Fino} = 44.4\%$$

$$\% \text{ A. Grueso} = 100\% - 44.4\%$$

$$\% \text{ A. Grueso} = 55.6\%$$

3.9.5.2.2.11 Volúmenes absolutos de los agregados.

Para determinar el volumen absoluto del agregado fino y grueso, se realiza de siguiente manera:

$$\text{A. Fino} = \left[\begin{array}{c} \text{Volumen Absoluto} \\ \text{del agregado} \end{array} \right] \times \left[\begin{array}{c} \% \text{ Agregado} \\ \text{Fino} \end{array} \right]$$

$$\text{A. Grueso} = \left[\begin{array}{c} \text{Volumen Absoluto} \\ \text{del agregado} \end{array} \right] \times \left[\begin{array}{c} \% \text{ Agregado} \\ \text{Grueso} \end{array} \right]$$

$$\text{A. Fino} = 0.647 \times 0.444 = 0.287 \text{ m}^3$$

$$\text{A. Grueso} = 0.647 - 0.287 = 0.359 \text{ m}^3$$

3.9.5.2.2.12 Pesos Secos de los Agregados.

$$\text{A. Fino} = (\text{Volumen A. Fino}) \times (\text{p.e. A. Fino})$$

$$\text{A. Fino} = 0.287 \text{ m}^3 \times 2.52 \times 1000 = 723.68 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{A. Grueso} = (\text{Volumen A. Grueso}) \times (\text{p.e. A. Grueso})$$



$$A. \text{ Grueso} = 0.359 \text{ m}^3 \times 2.55 \times 1000 = 916.42 \text{ kg/m}^3$$

3.9.5.2.2.13 Corrección por Humedad del Agregado.

Una vez obtenido los valores de diseño estos se encuentran en proporciones secas, es por ello que se tiene que realizar una corrección por la humedad de los agregados, obteniendo los valores corregidos.

Pesos húmedos:

$$A. \text{ Fino} : (\text{Peso seco}) \times (1 + w\%) \text{ kg/m}^3 = (723.68) \times (1 + 0.95/100)$$

$$A. \text{ Grueso} : (\text{Peso seco}) \times (1 + w\%) \text{ kg/m}^3 = (916.42) \times (1 + 0.83/100)$$

$$A. \text{ Fino} : 730.56 \text{ kg/m}^3$$

$$A. \text{ Grueso} : 924.02 \text{ kg/m}^3$$

Humedad superficial del agregado:

$$A. \text{ Fino} : \text{Conenido de humedad} - \text{absorción} = 0.83 - 2.10 = -1.27\%$$

$$A. \text{ Grueso} : \text{Conenido de humedad} - \text{absorción} = 0.95 - 2.70 = 1.75\%$$

Aporte de humedad:

$$A. \text{ Fino} : (\text{Peso seco}) \times (\text{humedad}) \text{ lt/m}^3 = (723.68) \times \left(-\frac{1.27}{100}\right)$$

$$A. \text{ Grueso} : (\text{Peso seco}) \times (\text{humedad}) \text{ lt/m}^3 = (916.42) \times \left(-\frac{1.75}{100}\right)$$

$$A. \text{ Fino} : -12.66 \text{ lt/m}^3$$

$$A. \text{ Grueso} : -11.64 \text{ lt/m}^3$$

$$\text{Total} : -24.3 \text{ lt/m}^3$$

Agua efectiva:

$$\text{Agua efectiva} = 205.00 - \text{Aporte humedad (lt/m}^3)$$

$$\text{Agua efectiva} = 205.00 - (-24.3) = 229.30 \text{ lt/m}^3$$

$$\text{Agua efectiva} = 229.30 \text{ lt/m}^3$$

Pesos corregidos:

$$\text{Cemento} : 366.07 \text{ kg/m}^3$$

Agua efectiva : 229.30 lt/m³

Agregado fino húmedo : 730.56 kg/m³

Agregado grueso húmedo : 924.02 kg/m³

3.9.5.2.2.14 *Proporciones de la Mezcla*

La proporción en pesos húmedos resultó:

$$\frac{366.07}{366.07} : \frac{730.56}{366.07} : \frac{924.02}{366.07} / \frac{229.30}{\frac{366.07}{42.5}}$$

$$1 : 2.00 : 2.52 / 26.62 \text{ lt/bolsa}$$

3.9.5.2.3 Método Walker

A continuación, se presenta la secuencia del diseño de mezcla del concreto normal por el método Walker.

3.9.5.2.3.1 *Cálculo de la Resistencia Promedio Requerida “f’cr”*

Se calculo la resistencia promedio de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 52:

Resistencia del concreto a la compresión promedio requerida.

f’c	f’cr
menos de 210	f’c + 70
210 a 350	f’c + 84
sobre 350	f’c + 98

Fuente: ACI-Comité 211

En la tabla 52, se seleccionó la resistencia a compresión promedio respecto a la resistencia a la compresión que se dese obtener.

Para una resistencia a compresión de 210 kg/cm², se considera un factor de 84 kg/cm², obteniendo una resistencia promedio de 294 kg/cm².

3.9.5.2.3.2 *Tamaño Máximo y Máximo Nominal del Agregado Grueso*

El Tamaño máximo y Tamaño máximo nominal seleccionados para la presente investigación fueron obtenidos respecto a la normativa NTP 400.037 (2018) los cuales son:

Tamaño Máximo : 1”

Tamaño Máximo Nominal : 3/4”

3.9.5.2.3.3 *Selección del Asentamiento*

Tabla 53:

Para Concretos bombeables.

Consistencia	Asentamiento
Seca	0" a 2"
Plástica	3" a 4"
Fluida	Mayor igual a 5"

Fuente: Abanto Castillo (2009)

En la tabla 53, se muestra el tipo de asentamiento de acuerdo a la consistencia que se seleccione.

Se ha seleccionado una consistencia plástica correspondiente a un asentamiento de 3” – 4”, para poder garantizar la trabajabilidad cuando se le añade los MEPS.

3.9.5.2.3.4 *Volumen Unitario de Agua*

Para obtener el volumen unitario de agua se ha usado la tabla establecida por el método WALKER:

Tabla 54:

Requerimientos aproximados de agua de mezclado para diferentes valores de asentamiento y tamaños máximos de agregados.

Tamaño máximo Nominal	Volumen unitario de agua, expresado en Lt/m ³					
	Slump: 1" a 2"		Slump: 3" a 4"		Slump: 6" a 7"	
	agregado redondeado	agregado angular	agregado redondeado	agregado angular	agregado redondeado	agregado angular
3/8"	185	212	201	227	230	250
1/2"	182	201	197	216	219	238
3/4"	170	189	185	204	208	227
1"	163	182	178	197	197	216
1 1/2"	155	170	170	185	185	204
2"	148	163	163	178	178	197
3"	136	151	151	167	163	182

Fuente: Rivva López (2000)

En la tabla 54, se puede ver los volúmenes unitarios de agua los cuales serán seleccionados de acuerdo al tamaño máximo, los valores de asentamiento y tipo de agregado por lo tanto para nuestro tipo de diseño se obtendría un volumen unitario de **204 l/m³**, correspondiente a un TMN de 3/4", un asentamiento de 3-4" y un agregado angular.

3.9.5.2.3.5 Selección del Contenido de Aire

Tabla 55:

Porcentaje de aire atrapado para diferentes valores de tamaño máximo nominal.

Tamaño Máximo Nominal	Aire Atrapado
3/8 "	3.0 %
1/2 "	2.5 %
3/4 "	2.0 %
1 "	1.5 %
1 1/2 "	1.0 %
2 "	0.5 %
3 "	0.3 %
6 "	0.2 %

Fuente: ACI-Comité 211

En la tabla 55, se puede ver los diferentes porcentajes de aire atrapado de acuerdo a los diferentes tamaños máximos nominales.

Por lo que para un TMN de 3/4" se obtiene un 2% de aire atrapado.

3.9.5.2.3.6 Selección de la Relación Agua/Cemento (a/c) por Resistencia.

Tabla 56:

Relación agua-cemento por resistencia.

f' cr (28 días)	Relación a/c de diseño en peso	
	Concretos sin aire incorporado	Concretos con aire incorporado
150	0.80	0.71
200	0.70	0.61
250	0.62	0.53
300	0.55	0.46
350	0.48	0.40
400	0.43	---
450	0.38	---

Fuente: ACI-Comité 211

En la tabla 56, se muestra la relación agua cemento en función de la resistencia promedio fcr.

Seleccionamos la relación agua cemento según la resistencia de $f'_{cr}=294 \text{ kg/cm}^2$ para un concreto sin aire incorporado. Se obtuvo una interpolación entre el límite obteniendo la relación agua - cemento de la siguiente manera:

$$\begin{array}{c} f'_{cr} \quad a/c \\ \left[\begin{array}{cc} 250 & 0.62 \\ 294 & X \\ 300 & 0.55 \end{array} \right] \end{array}$$

Interpolando se obtuvo la relación a/c:



$$\frac{300 - 250}{300 - 294} = \frac{0.55 - 0.62}{0.55 - X}$$

Despejando se tiene:

$$X = 0.56$$

Entonces tenemos:

$$a/c = 0.56$$

3.9.5.2.3.7 Factor Cemento

El factor cemento obtuvo de la división del volumen unitario agua sobre la relación agua/cemento:

$$FC = \frac{\text{Volumen Unitario de agua}}{\text{Relacion a/c}} = \frac{204 \text{ l/m}^3}{0.56} = 364.29 \text{ kg/m}^3$$

$$FC = 364.29 \text{ kg/m}^3$$

$$FC = \frac{364.29 \text{ kg/m}^3}{42.5 \text{ kg}}$$

$$FC = 8.6 \text{ bolsas/m}^3$$

3.9.5.2.3.8 Cálculo del Volumen Absoluto de la Pasta.

$$\text{Cemento} = \frac{\text{Factor cemento}}{\text{P.e. del cemento}} = \frac{364.29 \text{ kg}}{2850 \text{ kg/m}^3} = 0.128 \text{ m}^3$$

$$\text{Agua} = \frac{\text{Vol. unitario de agua}}{\text{P.e. del agua}} = \frac{204 \text{ l}}{1000 \text{ l/m}^3} = 0.204 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire} = \% \text{ de aire atrapado} = 2\% = 0.020 \text{ m}^3$$

Por lo tanto:



Cemento	: 0.128 m ³
Agua	: 0.204 m ³
Aire	: 0.020 m ³
<hr/>	
Volumen Abs de la pasta	0.352 m ³

3.9.5.2.3.9 Volumen Absoluto del Agregado

El volumen absoluto del agregado se calcula de la diferencia entre el 100% respecto al volumen absoluto de la pasta.

$$\text{Volumen absoluto del agregado} = 1 - 0.352$$

$$\text{Volumen absoluto del agregado} = 0.648$$

3.9.5.2.3.10 Porcentaje del Agregado Fino

Tabla 57:

Porcentaje del agregado fino (tablas Walker).

Tamaño Máximo Nominal del Agregado Grueso	Agregado Redondeado				Agregado Angular				
	Factor cemento expresado en sacos por metro cúbico								
	5	6	7	8	5	6	7	8	9
Agregado Fino - Módulo de Fineza de 2.3 a 2.4									
	5	6	7	8	5	6	7	8	9
3/8"	60	57	54	51	69	65	61	58	54
1/2"	49	46	43	40	57	54	51	48	45
3/4"	41	38	35	33	48	45	43	41	39
1"	50	37	34	32	47	44	42	40	38
1 1/2"	37	34	32	30	44	41	39	37	35
2"	36	33	31	29	43	40	38	36	34
Agregado Fino - Módulo de Fineza de 2.6 a 2.7									
	5	6	7	8	5	6	7	8	9
3/8"	66	62	59	56	75	71	67	64	60
1/2"	53	50	47	44	61	58	55	53	50
3/4"	44	41	38	36	51	48	46	44	42
1"	42	39	37	35	49	46	44	42	40
1 1/2"	40	37	35	33	47	44	42	40	38
2"	37	35	33	32	45	42	40	38	36
Agregado Fino - Módulo de Fineza de 3.0 a 3.1									
	5	6	7	8	5	6	7	8	9
3/8"	74	70	66	62	84	80	76	73	69
1/2"	59	56	53	50	70	66	62	59	55
3/4"	49	46	43	40	57	54	51	48	45
1"	47	44	41	38	55	52	49	46	43
1 1/2"	44	41	38	36	52	49	46	44	41
2"	42	38	36	34	49	46	44	42	40

Fuente: Rivva (2000)

En la tabla 57, se puede ver la obtención del volumen del agregado fino en porcentaje en función del TMN, el factor cemento y el tipo de agregado angular y redondeado.

Para un agregado grueso redondeado de TMN 3/4" y Fc de 8.60 bolsas/m³.

Se interpolan los valores hallando el porcentaje de agregado fino:

3.9.5.2.3.13 Valores de Diseño.

Las cantidades de materiales obtenidos por el método de diseño WALKER fueron:

Cemento : 364.29 kg

Agua de diseño : 204.00 lt

Agregado Fino Seco : 754.64 kg

Agregado Grueso Seco : 889.24 kg

3.9.5.2.3.14 Corrección por Humedad del Agregado.

Se procede a realizar la corrección por humedad de las proporciones secas con el fin de obtener los pesos húmedos.

Pesos húmedos:

A. Fino : $(Peso\ seco) \times (1 + w\%) \text{ kg/m}^3 = (754.64) \times (1 + 0.95/100)$

A. Grueso : $(Peso\ seco) \times (1 + w\%) \text{ kg/m}^3 = (889.24) \times (1 + 0.83/100)$

A. Fino : 761.81 kg/m^3

A. Grueso : 896.62 kg/m^3

Humedad superficial del agregado:

A. Fino : $Conenido\ de\ humedad - absorcion = 0.83 - 2.10 = -1.27\%$

A. Grueso : $Conenido\ de\ humedad - absorcion = 0.95 - 2.70 = 1.75\%$

Aporte de humedad:

A. Fino : $(Peso\ seco) \times (humedad) \text{ lt/m}^3 = (754.64) \times \left(-\frac{1.27}{100}\right)$

A. Grueso : $(Peso\ seco) \times (humedad) \text{ lt/m}^3 = (889.24) \times \left(-\frac{1.75}{100}\right)$

A. Fino : -13.21 lt/m^3

A. Grueso : -11.29 lt/m^3

Total : -24.5 lt/m^3

Agua efectiva:

Agua efectiva = 204.00 - Aporte humedad (lt/m^3)



$$\text{Agua efectiva} = 204.00 - (-24.5) = 228.50 \text{ lt/m}^3$$

$$\text{Agua efectiva} = 228.50 \text{ lt/m}^3$$

Pesos corregidos:

$$\text{Cemento} \quad \quad \quad : 364.29 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Agua efectiva} \quad \quad \quad : 228.50 \text{ lt/m}^3$$

$$\text{Agregado fino húmedo} \quad \quad : 761.81 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Agregado grueso húmedo} \quad : 896.62 \text{ kg/m}^3$$

3.9.5.2.3.15 Proporciones de la Mezcla

La proporción en pesos húmedos resultó:

$$\frac{364.29}{364.29} : \frac{761.81}{364.29} : \frac{896.62}{364.29} / \frac{228.50}{\frac{364.29}{42.5}}$$

$$1 : 2.09 : 2.46 / 26.34 \text{ lt/bolsa}$$

3.9.5.3 Proporción de los componentes del concreto con sustitución por esferas de poliestireno expandido modificado MEPS.

Una vez que se culminó los diseños de mezclas a través de los métodos ACI 211, MF y WALKER, obtenemos sus respectivas dosificaciones, luego se procedió al cálculo de las proporciones en peso de todos los materiales para la elaboración de probetas cilíndricas de 4"x8" respecto al norma ASTM C39.

Se obtienen las proporciones en peso del concreto en sustitución de 1m³ del volumen de concreto con esferas de poliestireno expandido modificado (MEPS) en proporciones del 5%, 15% y 30%, se realizó de la siguiente manera:

- Para el cálculo de los componentes del concreto por sustitución en porcentaje de MEPS se resta el porcentaje a sustituir por el 100%, el resultado se multiplica por cada uno de los componentes del concreto.

- Para el cálculo de la cantidad en peso de los MEPS se multiplica el porcentaje en sustitución de MEPS por el peso específico de los MEPS sometidos a temperaturas de 110°C, 130°C y 145°C.

Las proporciones en peso para un concreto con sustitución de MEPS para los métodos de diseño realizados se presentan a continuación.

3.9.5.3.1 Proporción de los componentes de concreto por sustitución en volumen con MEPS sometidos a temperatura de 110°C

A continuación, se muestra las proporciones en peso para un concreto con sustitución por MEPS a una temperatura de 110°C.

Tabla 58:

Proporción en peso de la cantidad de concreto en sustitución de MEPS a temperatura de 110°C para el método ACI 211.

Materiales	Método de diseño ACI 211			
	Concreto Normal	Concreto con MEPS a Temperatura 110°C con densidad 37.66 kg/m ³		
	CN	5%	15%	30%
Cemento (kg/m ³)	366.07	347.77	311.16	256.25
Agregado fino (kg/m ³)	717.00	681.15	609.45	501.90
Agregado grueso (kg/m ³)	937.72	890.83	797.06	656.40
Agua (lt/m ³)	229.24	217.78	194.85	160.47
MEPS (kg/m ³)	-	1.88	5.65	11.30

Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo.

En la tabla 58, se puede ver la proporción en peso de la cantidad de concreto en sustitución de MEPS que fueron sometidos a temperatura de 110°C, en proporciones de 5%, 15% y 30% para el método ACI-211.

Tabla 59:

Proporción en peso de la cantidad de concreto en sustitución de MEPS a temperatura de 110°C para el método MF.

Materiales	Método de diseño Modulo de Fineza			
	Concreto Normal	Concreto con MEPS a Temperatura 110°C con densidad 37.66 kg/m ³		
	CN	5%	15%	30%
Cemento (kg/m ³)	366.07	347.77	311.16	256.25
Agregado fino (kg/m ³)	730.56	694.03	620.97	511.39
Agregado grueso (kg/m ³)	924.02	877.82	785.42	646.82
Agua (lt/m ³)	229.30	217.84	194.91	160.51
MEPS (kg/m ³)	-	1.88	5.65	11.30

Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo

En la tabla 59, se puede ver la proporción en peso de la cantidad de concreto en sustitución de MEPS que fueron sometidos a temperatura de 110°C, en proporciones de 5%, 15% y 30% para el método MF.

Tabla 60:

Proporción en peso de la cantidad de concreto en sustitución de MEPS a temperatura de 110°C para el método WALKER.

Materiales	Método de diseño WALKER			
	Concreto Normal	Concreto con MEPS a Temperatura 110°C con densidad 37.66 kg/m ³		
	CN	5%	15%	30%
Cemento (kg/m ³)	364.29	346.07	309.64	255.00
Agregado fino (kg/m ³)	761.81	723.72	647.54	533.26
Agregado grueso (kg/m ³)	896.62	851.79	762.13	627.63
Agua (lt/m ³)	228.50	217.07	194.22	159.95
MEPS (kg/m ³)	-	1.88	5.65	11.30

Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo

En la tabla 60, se puede ver la proporción en peso de la cantidad de concreto en sustitución de MEPS que fueron sometidos a temperatura de 110°C, en proporciones de 5%, 15% y 30% para el método WALKER.

3.9.5.3.2 Proporción de los componentes de concreto por sustitución en volumen con MEPS sometidos a temperatura de 130°C

Las proporciones en sustitución de MEPS para una temperatura de 130°C se cambiaron por su dificultad en la elaboración del concreto a proporciones de 5%, 10% y 15% en sustitución de MEPS, el cálculo de estas proporciones se presenta seguidamente:

Tabla 61:

Proporción en peso de la cantidad de concreto en sustitución de MEPS a temperatura de 130°C para el método ACI 211.

Materiales	Método de diseño ACI 211			
	Concreto Normal	Concreto con MEPS a Temperatura 130°C con densidad 136.81 kg/m ³		
	CN	5%	10%	15%
Cemento (kg/m ³)	366.07	347.77	329.46	311.16
Agregado fino (kg/m ³)	717.00	681.15	645.30	609.45
Agregado grueso (kg/m ³)	937.72	890.83	843.95	797.06
Agua (lt/m ³)	229.24	217.78	206.32	194.85
MEPS (kg/m ³)	-	6.84	13.68	20.52

Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo

En la tabla 61, se puede ver la proporción en peso de la cantidad de concreto en sustitución de MEPS que fueron sometidos a temperatura de 130°C, en proporciones de 5%, 15% y 30% para el método ACI-211.

Tabla 62:

Proporción en peso de la cantidad de concreto en sustitución de MEPS a temperatura de 130°C para el método Modulo de fineza de la combinación de agregados.

Materiales	Método de diseño Modulo de Fineza			
	Concreto Normal	Concreto con MEPS a Temperatura 130°C con densidad 136.81 kg/m ³		
	CN	5%	10%	15%
Cemento (kg/m ³)	366.07	347.77	329.46	311.16
Agregado fino (kg/m ³)	730.56	694.03	657.50	620.97
Agregado grueso (kg/m ³)	924.02	877.82	831.62	785.42
Agua (lt/m ³)	229.30	217.84	206.37	194.91
MEPS (kg/m ³)	-	6.84	13.68	20.52

Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo

En la tabla 62, se puede ver la proporción en peso de la cantidad de concreto en sustitución de MEPS que fueron sometidos a temperatura de 130°C, en proporciones de 5%, 15% y 30% para el método MF.

Tabla 63:

Proporción en peso de la cantidad de concreto en sustitución de MEPS a temperatura de 145°C para el método WALKER.

Materiales	Método de diseño WALKER			
	Concreto Normal	Concreto con MEPS a Temperatura 130°C con densidad 136.81 kg/m ³		
	CN	5%	10%	15%
Cemento (kg/m ³)	364.29	346.07	327.86	309.64
Agregado fino (kg/m ³)	761.81	723.72	685.63	647.54
Agregado grueso (kg/m ³)	896.62	851.79	806.96	762.13
Agua (lt/m ³)	228.50	217.07	205.65	194.22
MEPS (kg/m ³)	-	6.84	13.68	20.52

Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo

En la tabla 63, se puede ver la proporción en peso de la cantidad de concreto en sustitución de MEPS que fueron sometidos a temperatura de 130°C, en proporciones de 5%, 15% y 30% para el método WALKER.

3.9.5.3.3 Proporción de los componentes de concreto por sustitución en volumen con MEPS sometidos a temperatura de 145°C

Las proporciones en sustitución de MEPS para una temperatura de 145°C se cambiaron por su dificultad en la elaboración del concreto a proporciones de 5%, 10% y 15% en sustitución de MEPS.

Tabla 64:

Proporción en peso de la cantidad de concreto en sustitución de MEPS a temperatura de 145°C para el método ACI 211..

Materiales	Método de diseño ACI 211			
	Concreto Normal	Concreto con MEPS a Temperatura 145°C con densidad 220.10 kg/m ³		
	CN	5%	10%	15%
Cemento (kg/m ³)	366.07	347.77	329.46	311.16
Agregado fino (kg/m ³)	717.00	681.15	645.30	609.45
Agregado grueso (kg/m ³)	937.72	890.83	843.95	797.06
Agua (lt/m ³)	229.24	217.78	206.32	194.85
MEPS (kg/m ³)	-	11.01	22.01	33.02

Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo

En la tabla 58, se puede ver la proporción en peso de la cantidad de concreto en sustitución de MEPS que fueron sometidos a temperatura de 145°C, en proporciones de 5%, 15% y 30% para el método ACI-211.

Tabla 65:

Proporción en peso de la cantidad de concreto en sustitución de MEPS a temperatura de 145°C para el método Modulo de fineza de la combinación de agregados.

Materiales	Método de diseño Modulo de Fineza			
	Concreto Normal	Concreto con MEPS a Temperatura 145°C con densidad 220.10 kg/m ³		
	CN	5%	10%	15%
Cemento (kg/m ³)	366.07	347.77	329.46	311.16
Agregado fino (kg/m ³)	730.56	694.03	657.50	620.97
Agregado grueso (kg/m ³)	924.02	877.82	831.62	785.42
Agua (lt/m ³)	229.30	217.84	206.37	194.91
MEPS (kg/m ³)	-	11.01	22.01	33.02

Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo

En la tabla 65, se puede ver la proporción en peso de la cantidad de concreto en sustitución de MEPS que fueron sometidos a temperatura de 145°C, en proporciones de 5%, 15% y 30% para el método MF.

Tabla 66:

Proporción en peso de la cantidad de concreto en sustitución de MEPS a temperatura de 145°C para el método WALKER.

Materiales	Método de diseño WALKER			
	Concreto Normal	Concreto con MEPS a Temperatura 145°C con densidad 220.10 kg/m ³		
	CN	5%	10%	15%
Cemento (kg/m ³)	364.29	346.07	327.86	309.64
Agregado fino (kg/m ³)	761.81	723.72	685.63	647.54
Agregado grueso (kg/m ³)	896.62	851.79	806.96	762.13
Agua (lt/m ³)	228.50	217.07	205.65	194.22
MEPS (kg/m ³)	-	11.01	22.01	33.02

Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo

En la tabla 66, se puede ver la proporción en peso de la cantidad de concreto en sustitución de MEPS que fueron sometidos a temperatura de 145°C, en proporciones de 5%, 15% y 30% para el método WALKER.



3.9.6 Elaboración de probetas de concreto y curado en laboratorio

Normativa: NTP 339.033, ASTM C192, ASTM C31

3.9.6.1 Elaboración de concreto.

a) Equipos e instrumentos

- Balanza.
- Probeta graduada.
- Mezcladora de 5 p3.
- Guantes.
- Cronometro.
- Herramientas manuales.

b) Procedimiento

- Se pesaron los materiales del concreto normal y concreto con sustitución del 5%,15% y 30% de esferas de poliestireno expandido modificado (MEPS) que fueron sometidas a temperaturas de 110°C, 130°C y 145°C. Según el diseño de mezclas calculado anteriormente.
- Se prepararon los moldes de acuerdo a la cantidad requerido de tanda a mezclar; a su vez se preparó la mezcladora y las herramientas necesarias.
- Se humedeció las paredes de la mezcladora y todos los materiales que tendrán contacto directo con el concreto.
- Para el mezclado del concreto normal y concreto con esferas de poliestireno expandido modificado (MEPS) se realizó del siguiente modo:
- Se mezcla manualmente en un recipiente las esferas de poliestireno expandido modificado (MEPS) con el agregado fino, hasta obtener una combinación homogénea. (este procedimiento se dará en caso de un concreto con esferas de poliestireno expandido modificado (MEPS), caso contrario se realizará el procedimiento siguiente.)



- Con la mezcladora en posición de trabajo se colocó el total de agregado grueso y el agregado fino (sea el caso de un concreto con esferas de poliestireno expandido modificado, estas fueron mezcladas previamente con el agregado fino).
- Verter la mitad del agua de amasado en la mezcladora.
- Mezclar los materiales adicionados durante 1 minutos, inmediatamente agregar el cemento y la totalidad de agua de amasado.
- Se comenzó a cronometrar el mezclado durante 3 minutos una vez adicionado la totalidad de los materiales de la mezcla.
- Detener la mezcladora y dejar reposar la mezcla durante unos 2 minutos. Si en las paredes y las paletas de la mezcladora se encuentra adherido algo de mezcla, se procede a retirarlas y combinarlas con la mezcla utilizando un cucharón el cual previamente fue humedecido para no afectar la relación de agua de diseño.
- Finalmente se procedió a realizar el remezclado del concreto durante unos 2 minutos.

Figura 49:

Pesado de los materiales del concreto normal con sustitución de esferas de poliestireno expandido modificado MEPS.



Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo

La figura 49, se muestra la preparación y pesado de los materiales para la preparación de un concreto con sustitución de esferas de poliestireno expandido modificado MEPS.

Figura 50:

Proceso de elaboración del concreto normal con sustitución de esferas de poliestireno expandido modificado MEPS.



Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo.

La figura 50, se muestra el colocado de los materiales y elaboración del concreto con sustitución de MEPS.

3.9.6.2 Elaboración de probetas cilíndricas.

a) Equipos e instrumentos

- Moldes cilíndricos de 4"x8".
- Varilla lisa compactadora de 3/8".
- Mazo de goma.
- Cucharón.
- Herramientas manuales.

b) Procedimiento

- Situamos los moldes cilíndricos en una superficie nivelada que se encuentre nivelada libre de vibraciones.
- Se lubrico ligeramente la superficie interior de las paredes de los moldes cilíndricos con un desmoldante para evitar la adherencia del concreto.

- Colocamos la mezcla de concreto en los moldes, se procede a llenar la primera capa de concreto a la mitad del molde, y se procedió a chusear 25 veces helicoidalmente con una varilla de 3/8", posterior a ello con el martillo de goma se golpea ligeramente 12 veces alrededor del molde cilíndrico, seguidamente se completa el llenado de la otra mitad del molde y se procede a realizar el mismo procedimiento que la capa anterior.
- Seguidamente se espera un momento y se procede a él enrase de la parte superior de los moldes cilíndricos utilizando una badilejo para poder obtener un acabado liso y nivelado.

Figura 51:

Elaboración de probetas de concreto.



Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo.

La figura 51, se muestra el proceso de elaboración y acabado de las probetas de concreto por sustitución de MEPS.

3.9.6.3 Curado del concreto.

Después de las 24 horas del moldeo y acabado de las probetas de concreto, se procedió extracción de estos de los moldes y fueron transportados a la poza de curado, la cual se encuentra saturada con agua cubriendo totalmente los especímenes, la temperatura del agua debe de comprender entre los 23°C para lo cual se utilizó 2 calentadora de agua y una bomba para circulación del agua, para lograr en lo posible llegar a cumplir con lo referido en la norma ASTM C192.

Los especímenes permanecieron en la poza de curado hasta que estos se les requieran realizar el ensayo de compresión del concreto y ensayo de absorción del concreto.

Figura 52:

Poza de curado de probetas de concreto.



Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo

La figura 52, se muestra el curado de las probetas de concreto con sustitución de MEPS en la poza de curado.

Figura 53:

Poza de curado de probetas de concreto.



Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo

La figura 53, se muestra la poza de curado con probetas de concreto con sustitución de MEPS.

3.9.7 Ensayos realizados

3.9.7.1 Ensayos del concreto fresco.

3.9.7.1.1 Ensayo de Revenimiento o Asentamiento en el Cono de Abrams

Normativa: MTC E705, NTP 339.035, ASTM C143

a) Equipos e instrumentos

- Varilla Lisa de 5/8”.
- Cono de Abrams.
- Herramientas manuales.

b) Procedimiento

- Se prepara el molde, humedeciendo su superficie interior y colocándolo en una superficie plana. Se pisa fuertemente los estribos del molde para mantenerlo inmóvil y seguidamente se vertió en tres capas la muestra de concreto, cada capa a un tercio del volumen del molde.

- Todas las capas se compactaron utilizando una varilla lisa de 5/8” aplicando 25 golpes verticales distribuidos uniformemente de forma espiral. En la capa del fondo se compacto en todo su espesor evitando golpear la base; la capa inmediatamente superior se compactó penetrando ligeramente la capa inmediatamente inferior.
- La capa superior se llenó hasta que la mezcla de concreto sobresalga en exceso, seguidamente se procede al compactado. Posteriormente se enrasa con la varilla al molde y se procede al alzado del molde cuidadosamente en hacia arriba.
- Se procede a registrar el asentamiento el cual se obtiene de la diferencia entre la altura del cono y la altura de la mezcla fresca.
- Estos procedimientos se realizaron

Figura 54:

Asentamiento del concreto normal.



Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo

La figura 54, se puede ver la realización de la prueba de asentamiento del concreto SLUMP para un concreto normal.

Figura 55:

Asentamiento del concreto en sustitución de MEPS (130°C) 15%.



Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo

La figura 55, se puede ver la realización de la prueba de asentamiento del concreto SLUMP para un concreto con sustitución de MEPS.

3.9.7.2 Ensayos del concreto endurecido.

3.9.7.2.1 Ensayo de Resistencia a la Compresión del Concreto

Normativa: MTC E704, NTP 339.034, ASTM C39

El ensayo consiste en aplicar una carga axial a una probeta de concreto hasta que esta falle, obteniendo la resistencia a la compresión.

La resistencia a la compresión del concreto se refiere a la carga máxima por unidad de área de la muestra antes de la falla a la compresión (fisuración, fractura) (Abanto, 2009).

a) Equipos e instrumentos

- Máquina de compresión.
- Almohadillas de neopreno
- Platos metálicos de roturas

b) Procedimiento

- Retirar los especímenes que serán ensayados de la poza de curado.
- Colocar un código para identificar los especímenes durante el ensayo.

- Medir y tomar apunte del diámetro y altura de los especímenes, estas medidas se deberán tomar en diferentes sitios del espécimen para obtener poder obtener un promedio y obtener el diámetro y altura.
- Colocar los moldes metálicos con neopreno en los especímenes. Luego centrarlos en la máquina de ensayo a compresión.
- Aplicar la carga de forma continua, con una velocidad de carga para especímenes de 4"x8" recomendado los rangos de 1.62 kN/s a 2.43 kN/s. Se aplicará la carga hasta completar la rotura.

c) Cálculo

Para el cálculo de la resistencia a la compresión se utilizó la siguiente formula:

$$f'c = \frac{P}{A} \left(\frac{kg}{cm^2} \right); A = \frac{\pi \phi^2}{4}$$

$f'c$: Es la resistencia de rotura a la compresión del concreto. (Kg/cm²).

P : Máxima carga Aplicada (kg).

ϕ : Diámetro de la probeta cilíndrica (cm).

A : Área promedio de la probeta (cm²).

Figura 56:

Ensayo a la compresión del concreto.



Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo

La figura 56, se muestra la realización del ensayo de resistencia compresión de las probetas de concreto normal y con sustitución de MEPS.

3.9.7.2.2 Ensayo de Determinación de la densidad, absorción y volumen de vacíos en concreto endurecido

Normativa: NTP 339.187, UNE 12390 - 7:2000, ASTM C642

a) Equipos e instrumentos

- Balanza sensibilidad a 0.5g equipada con dispositivo para suspender la muestra.
- Canastilla de malla de alambre.
- Depósito de agua.
- Franelas de tela para secado de muestra
- Recipientes
- Horno con temperatura constante de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.

b) Procedimiento

- Se prepararon las muestras las cuales se obtiene de las probetas de concreto de 4"x8". Se cortaron las probetas utilizando una amoladora por la parte central de la altura de la probeta y luego cinco centímetros por los lados opuestos, se descartó los extremos y solo se consideró las dos partes centrales por ser más homogéneas.
- Colocamos la muestra para su secado en el horno a una temperatura constante de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas. Luego sacar la muestra, se deja enfriar y se procedió a pesar la muestra obteniendo el peso seco que se denominara el parámetro A.

Figura 57:

Secado de la muestra en el horno.



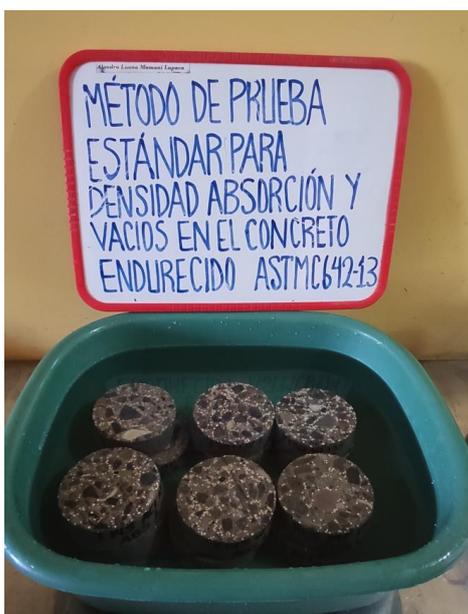
Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo

La figura 57, se aprecia el secado al horno de las muestras a una temperatura de 110°C durante 24 horas.

- Seguidamente colocamos las muestras en un recipiente y comenzamos a agregar agua hasta cubrir todas las muestras saturándolas por un periodo de 48 horas.

Figura 58:

Saturado de la muestra por un periodo de 48 horas.



Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo

La figura 58, se aprecia el saturado de la muestras en un recipiente por un periodo de 48 horas.

- Se retiró la muestra del agua, secándola eliminando la humedad de la superficie utilizando una franela o paño absorbente y se determinó su peso después de la inmersión que se denominara el parámetro B.

Figura 59:

Secado superficial de la muestra húmeda.



Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo

La figura 59, se aprecia el secado superficialmente de la muestra húmeda utilizando franelas.

- Luego se procedió a saturar y ebulir las muestras colocándolas en un recipiente por un periodo de 5 horas. Se deja enfriar luego se procedió a obtener el peso saturado ebulido que lo denominaremos el parámetro C.

Figura 60:

Saturado y ebullición de muestra.



Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo

La figura 60, se aprecia el saturado y ebullición de las muestras por un periodo tiempo y dejando enfriar.

- Finalmente se introduce la muestra a una canastilla la cual se encuentra sumergida en agua y que pende de una balanza, obteniendo el peso suspendido el cual se denominara el parámetro D.

Figura 61:

Sumergido de la muestra en canastilla suspendida.



Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo

La figura 61, se aprecia el sumergido de las muestras en una canastilla sumergida para calcular el peso sumergido.

c) Toma de datos

Tabla 67:

Datos para cálculo de densidad, absorción y volumen de vacíos del concreto método

ACI-211 con adición de MEPS.

Descripción	Días	Peso al horno (A)	Peso (SSS) (B)	Peso Ebullición (C)	Peso Sumergido (D)
ACI (CN) - 1	7	736.4	783.4	788.4	446.5
ACI (CN) - 2	7	786.7	837.3	839.3	466.6
ACI (CN) - 3	14	891.1	947.7	952.7	530.0
ACI (CN) - 4	14	885.1	933.5	934.5	510.0
ACI (CN) - 5	28	801.3	853.6	855.6	473.2
ACI (CN) - 6	28	774.0	824.1	828.1	452.2
ACI MEP T110 5% - 1	7	777.4	823.5	825.5	453.2
ACI MEP T110 5% - 2	7	821.8	869.1	871.1	481.6
ACI MEP T110 5% - 3	14	785.7	831.8	833.8	456.0
ACI MEP T110 5% - 4	14	743.9	785.7	786.7	432.0
ACI MEP T110 5% - 5	28	817.6	865.4	866.4	482.0
ACI MEP T110 5% - 6	28	795.6	841.7	845.7	472.8
ACI MEP T110 15% - 1	7	760.4	803.1	805.1	429.5
ACI MEP T110 15% - 2	7	750.5	793.5	797.5	434.9
ACI MEP T110 15% - 3	14	788.8	833.5	838.5	449.2
ACI MEP T110 15% - 4	14	758.9	803.1	808.1	428.0
ACI MEP T110 15% - 5	28	778.7	825.8	826.8	446.9
ACI MEP T110 15% - 6	28	715.4	757.1	762.1	411.5
ACI MEP T110 30% - 1	7	699.9	747.3	748.3	379.6
ACI MEP T110 30% - 2	7	671.2	719.4	724.4	366.0
ACI MEP T110 30% - 3	14	684.3	733.8	734.8	383.7
ACI MEP T110 30% - 4	14	732.4	781.0	786.0	394.3
ACI MEP T110 30% - 5	28	707.6	755.5	759.5	398.2
ACI MEP T110 30% - 6	28	826.1	882.3	885.3	462.7
ACI MEP T130 5% - 1	7	769.0	806.4	808.4	447.9
ACI MEP T130 5% - 2	7	813.7	851.4	854.4	459.9
ACI MEP T130 5% - 3	14	783.4	819.3	822.3	446.8
ACI MEP T130 5% - 4	14	797.9	835.2	837.2	457.7
ACI MEP T130 5% - 5	28	727.3	761.9	766.9	423.4
ACI MEP T130 5% - 6	28	873.1	913.6	914.6	505.1
ACI MEP T130 10% - 1	7	780.3	815.1	816.1	435.7



ACI MEP T130 10% - 2	7	798.2	832.1	834.1	438.7
ACI MEP T130 10% - 3	14	753.6	786.2	789.2	420.9
ACI MEP T130 10% - 4	14	780.6	814.0	815.0	430.9
ACI MEP T130 10% - 5	28	735.1	765.1	770.1	419.8
ACI MEP T130 10% - 6	28	803.3	838.1	840.1	453.6
ACI MEP T130 15% - 1	7	793.5	829.9	831.9	434.0
ACI MEP T130 15% - 2	7	774.3	811.1	816.1	415.4
ACI MEP T130 15% - 3	14	804.8	841.2	842.2	446.2
ACI MEP T130 15% - 4	14	768.3	803.9	804.9	408.7
ACI MEP T130 15% - 5	28	795.2	831.2	833.2	436.4
ACI MEP T130 15% - 6	28	752.4	786.5	791.5	390.9
ACI MEP T145 5% - 1	7	750.0	786.1	791.1	420.4
ACI MEP T145 5% - 2	7	742.4	778.8	780.8	413.1
ACI MEP T145 5% - 3	14	876.0	916.5	917.5	507.7
ACI MEP T145 5% - 4	14	830.7	870.3	873.3	481.9
ACI MEP T145 5% - 5	28	794.9	832.7	836.7	460.6
ACI MEP T145 5% - 6	28	817.4	857.2	858.2	468.1
ACI MEP T145 10% - 1	7	754.5	791.7	793.7	418.0
ACI MEP T145 10% - 2	7	723.0	761.3	763.3	409.5
ACI MEP T145 10% - 3	14	755.3	792.3	794.3	414.9
ACI MEP T145 10% - 4	14	843.9	885.4	886.4	465.9
ACI MEP T145 10% - 5	28	768.4	807.4	809.4	435.9
ACI MEP T145 10% - 6	28	805.6	844.6	845.6	459.7
ACI MEP T145 15% - 1	7	748.0	791.4	796.4	410.9
ACI MEP T145 15% - 2	7	744.2	787.3	790.3	411.8
ACI MEP T145 15% - 3	14	750.7	794.5	796.5	409.6
ACI MEP T145 15% - 4	14	754.7	797.2	799.2	403.8
ACI MEP T145 15% - 5	28	713.1	754.0	759.0	392.2
ACI MEP T145 15% - 6	28	754.3	798.5	799.5	414.6

Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo

En la tabla 67, se puede ver el registro de los datos que fueron el peso al horno, peso saturado superficialmente seco, peso en ebullición y peso sumergido. Para cada uno de las probetas de concreto por el método de diseño ACI-211.

Tabla 68:

Datos para cálculo de densidad, absorción y volumen de vacíos del concreto método módulo de fineza de la combinación de los agregados con adición de MEPS.

Descripción	Días	Peso al horno (A)	Peso (SSS) (B)	Peso Ebullition (C)	Peso Sumergido (D)
MF (CN) - 1	7	774.7	828.5	833.5	465.9
MF (CN) - 2	7	773.0	824.5	825.5	461.3
MF (CN) - 3	14	835.4	890.2	895.2	492.6
MF (CN) - 4	14	800.5	854.3	855.3	477.6
MF (CN) - 5	28	803.4	856.8	859.8	488.7
MF (CN) - 6	28	835.4	891.4	896.4	506.9
MF MEP T110 5% - 1	7	830.0	874.1	878.1	488.4
MF MEP T110 5% - 2	7	802.1	844.3	847.3	468.6
MF MEP T110 5% - 3	14	848.8	892.7	893.7	495.6
MF MEP T110 5% - 4	14	794.7	834.7	838.7	444.6
MF MEP T110 5% - 5	28	785.9	827.0	829.0	462.7
MF MEP T110 5% - 6	28	789.4	831.5	836.5	466.2
MF MEP T110 15% - 1	7	734.9	775.3	776.3	417.4
MF MEP T110 15% - 2	7	751.6	793.6	797.6	424.2
MF MEP T110 15% - 3	14	783.5	828.8	831.8	443.8
MF MEP T110 15% - 4	14	734.9	775.4	778.4	400.1
MF MEP T110 15% - 5	28	794.0	839.3	843.3	453.2
MF MEP T110 15% - 6	28	751.8	793.5	797.5	423.4
MF MEP T110 30% - 1	7	699.6	740.4	742.4	385.7
MF MEP T110 30% - 2	7	668.9	706.6	707.6	361.5
MF MEP T110 30% - 3	14	719.8	760.3	764.3	392.6
MF MEP T110 30% - 4	14	872.1	923.0	928.0	470.7
MF MEP T110 30% - 5	28	657.7	696.4	697.4	367.2
MF MEP T110 30% - 6	28	746.0	790.4	795.4	416.7
MF MEP T130 5% - 1	7	749.0	785.2	788.2	418.6
MF MEP T130 5% - 2	7	805.0	846.5	849.5	453.8
MF MEP T130 5% - 3	14	764.7	802.2	805.2	431.2
MF MEP T130 5% - 4	14	801.3	840.3	841.3	458.3
MF MEP T130 5% - 5	28	829.9	869.7	873.7	469.9
MF MEP T130 5% - 6	28	767.7	805.0	809.0	429.4
MF MEP T130 10% - 1	7	738.2	769.6	773.6	415.2
MF MEP T130 10% - 2	7	786.7	817.5	818.5	437.4
MF MEP T130 10% - 3	14	790.8	822.6	825.6	431.9
MF MEP T130 10% - 4	14	790.4	821.6	826.6	435.9
MF MEP T130 10% - 5	28	747.9	777.6	779.6	412.7
MF MEP T130 10% - 6	28	838.1	872.0	877.0	469.0
MF MEP T130 15% - 1	7	753.0	786.0	789.0	390.2



MF MEP T130 15% - 2	7	815.0	851.9	855.9	456.0
MF MEP T130 15% - 3	14	772.0	807.9	809.9	413.8
MF MEP T130 15% - 4	14	799.8	835.6	836.6	440.7
MF MEP T130 15% - 5	28	833.7	872.4	873.4	478.0
MF MEP T130 15% - 6	28	822.8	859.5	864.5	464.1
MF MEP T145 5% - 1	7	720.5	757.2	760.2	410.8
MF MEP T145 5% - 2	7	812.8	853.3	857.3	461.6
MF MEP T145 5% - 3	14	823.3	864.0	865.0	476.3
MF MEP T145 5% - 4	14	748.4	785.0	786.0	430.1
MF MEP T145 5% - 5	28	894.3	937.5	938.5	519.6
MF MEP T145 5% - 6	28	709.4	744.2	746.2	402.0
MF MEP T145 10% - 1	7	851.6	892.8	897.8	482.2
MF MEP T145 10% - 2	7	767.8	806.8	810.8	436.8
MF MEP T145 10% - 3	14	808.7	848.6	850.6	455.5
MF MEP T145 10% - 4	14	729.1	766.8	767.8	412.6
MF MEP T145 10% - 5	28	751.2	789.5	790.5	423.8
MF MEP T145 10% - 6	28	719.1	754.7	757.7	395.7
MF MEP T145 15% - 1	7	781.9	820.0	824.0	424.6
MF MEP T145 15% - 2	7	819.5	856.4	859.4	448.9
MF MEP T145 15% - 3	14	778.8	813.2	817.2	436.5
MF MEP T145 15% - 4	14	762.3	796.7	799.7	432.4
MF MEP T145 15% - 5	28	747.2	782.3	783.3	419.3
MF MEP T145 15% - 6	28	837.2	877.2	882.2	463.4

Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo

En la tabla 68, se muestra la recolección de datos que fueron el peso al horno, peso saturado superficialmente seco, peso en ebullición y peso sumergido. Para cada uno de las probetas de concreto por el método de diseño MF.

Tabla 69:

Datos para cálculo de densidad, absorción y volumen de vacíos del concreto método

WALKER con adición de MEPS.

Descripción	Días	Peso al horno (A)	Peso (SSS) (B)	Peso Ebullition (C)	Peso Sumergido (D)
W (CN) - 1	7	764.3	820.6	823.6	453.9
W (CN) - 2	7	757.0	817.3	819.3	450.3
W (CN) - 3	14	810.5	868.0	872.0	483.7
W (CN) - 4	14	735.8	785.9	789.9	439.8
W (CN) - 5	28	801.6	863.1	865.1	469.8
W (CN) - 6	28	796.1	855.9	858.9	476.6
W MEP T110 5% - 1	7	898.1	948.2	953.2	518.4



W MEP T110 5% - 2	7	830.5	878.0	880.0	481.4
W MEP T110 5% - 3	14	725.1	764.4	769.4	416.5
W MEP T110 5% - 4	14	772.7	815.5	817.5	441.2
W MEP T110 5% - 5	28	791.1	835.7	836.7	458.0
W MEP T110 5% - 6	28	731.3	773.0	775.0	421.9
W MEP T110 15% - 1	7	762.1	794.4	799.4	423.4
W MEP T110 15% - 2	7	814.2	848.0	853.0	453.8
W MEP T110 15% - 3	14	765.4	796.8	797.8	435.5
W MEP T110 15% - 4	14	833.0	867.5	871.5	473.5
W MEP T110 15% - 5	28	822.6	857.5	858.5	462.8
W MEP T110 15% - 6	28	737.5	768.9	773.9	420.9
W MEP T110 30% - 1	7	664.0	709.2	711.2	361.9
W MEP T110 30% - 2	7	681.0	727.4	732.4	371.5
W MEP T110 30% - 3	14	761.1	813.4	814.4	412.6
W MEP T110 30% - 4	14	722.9	771.2	774.2	396.2
W MEP T110 30% - 5	28	687.6	734.5	736.5	368.7
W MEP T110 30% - 6	28	711.3	758.7	763.7	376.2
W MEP T130 5% - 1	7	795.8	836.2	840.2	439.7
W MEP T130 5% - 2	7	810.4	849.3	853.3	462.6
W MEP T130 5% - 3	14	843.2	885.4	888.4	474.2
W MEP T130 5% - 4	14	797.1	836.4	838.4	450.8
W MEP T130 5% - 5	28	713.5	748.0	750.0	411.9
W MEP T130 5% - 6	28	878.6	921.8	924.8	515.8
W MEP T130 10% - 1	7	786.1	821.5	826.5	438.2
W MEP T130 10% - 2	7	776.8	811.1	814.1	439.0
W MEP T130 10% - 3	14	765.2	799.2	801.2	424.4
W MEP T130 10% - 4	14	742.8	776.7	777.7	412.7
W MEP T130 10% - 5	28	768.2	803.6	806.6	432.7
W MEP T130 10% - 6	28	763.2	799.2	800.2	421.9
W MEP T130 15% - 1	7	681.4	713.3	714.3	350.5
W MEP T130 15% - 2	7	724.7	760.0	763.0	364.4
W MEP T130 15% - 3	14	740.6	777.3	781.3	382.6
W MEP T130 15% - 4	14	744.3	777.9	778.9	381.2
W MEP T130 15% - 5	28	638.0	666.7	668.7	324.2
W MEP T130 15% - 6	28	738.3	772.3	775.3	371.4
W MEP T145 5% - 1	7	789.3	827.7	831.7	436.3
W MEP T145 5% - 2	7	797.3	832.4	836.4	454.1
W MEP T145 5% - 3	14	772.9	809.1	814.1	451.5
W MEP T145 5% - 4	14	765.9	801.3	804.3	443.9
W MEP T145 5% - 5	28	763.0	799.6	804.6	435.5
W MEP T145 5% - 6	28	804.7	843.5	847.5	453.6
W MEP T145 10% - 1	7	739.9	776.9	780.9	389.2
W MEP T145 10% - 2	7	796.2	835.0	840.0	425.7
W MEP T145 10% - 3	14	775.5	815.1	816.1	418.5
W MEP T145 10% - 4	14	765.4	803.3	806.3	415.0



W MEP T145 10% - 5	28	724.7	760.8	763.8	401.7
W MEP T145 10% - 6	28	714.6	749.3	751.3	399.6
W MEP T145 15% - 1	7	759.9	795.3	798.3	408.0
W MEP T145 15% - 2	7	778.8	814.2	816.2	417.4
W MEP T145 15% - 3	14	783.7	821.0	823.0	431.9
W MEP T145 15% - 4	14	653.1	684.0	689.0	358.8
W MEP T145 15% - 5	28	729.6	764.0	768.0	382.3
W MEP T145 15% - 6	28	758.2	794.2	797.2	419.8

Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo

En la tabla 69, se muestra la recolección de datos que fueron el peso al horno, peso saturado superficialmente seco, peso en ebullición y peso sumergido. Para cada uno de las probetas de concreto por el método de diseño WALKER.

d) Cálculo

Absorción tras la inmersión

$$\text{Abs Inmersión (\%)} = [(B - A)/A] \times 100$$

Absorción tras inmersión y ebullición

$$\text{Abs Inmersión y ebullición (\%)} = [(C - A)/A] \times 100$$

Densidad aparente seca

$$g_1 = [A/(C - D)] \cdot \rho$$

Densidad aparente tras la inmersión

$$\text{Densidad inmersión} = [B/(C - D)] \cdot \rho$$

Densidad aparente tras la inmersión y ebullición

$$\text{Densidad inmersión y ebullición} = [C/(C - D)] \cdot \rho$$

Densidad aparente

$$g_2 = [A/(A - D)] \cdot \rho$$

Volumen de espacios porosos permeable

$$\text{Vol. vacíos permeables (\%)} = (g_2 - g_1)/g_2 \times 100$$

Donde:

A = masa de la muestra secada al horno en el aire (gr).



B = masa de la muestra seca en superficie en el aire después de la inmersión (gr).

C = masa de la muestra seca en superficie en el aire después de la inmersión y ebullición (gr).

D = masa aparente de la muestra en el agua después de la inmersión y ebullición (gr).

g_1 = densidad aparente, seca (gr/cm^3).

g_2 = densidad aparente (gr/cm^3).

ρ = densidad del agua = $1 \text{ g}/\text{cm}^3$.

3.10 DISEÑO DE LAS REDES NEURONALES ARTIFICIALES PARA LA PREDICCIÓN

En la presente investigación se consideraron realizar 2 tipos de Redes Neuronales Artificiales (RNA) para la predicción de la resistencia a la compresión y trabajabilidad. La realización de estos dos por separado se realizó debido a la cantidad disponible de información, siendo un total de 270 resultados de ensayos de resistencia a compresión y 30 de trabajabilidad SLUMP. Además, que las variables de entrada involucradas en cada uno de las dos RNA no tienen influencia en el otro, como tal caso se puede observar en la variable de entrada “edad” que influye en la predicción de resistencia a compresión mas no en la trabajabilidad.

3.10.1 Red Neuronal Artificial para la resistencia a la compresión.

3.10.1.1 Selección de la data para variables de entrada y salida para la elaboración de la RNA

Se elaboró una base de datos a partir de los resultados de los ensayos de laboratorio de los materiales, proporciones en peso de materiales de los diseños de mezcla, propiedades en estado endurecido del concreto entre otros relevantes que influyeron en la resistencia a la compresión.



El total de los datos recolectados fueron 270 registros cada uno con 17 variables estos fueron almacenados en una base data. De los cuales se seleccionaron 90% del total de los datos correspondiente a 243 registros para el entrenamiento, validación y test; para la elaboración de la RNA, el restante 10% de la data corresponde a los 27 registros los cuales fueron seleccionados de manera aleatoria y estos fueron utilizados para probar los modelos de RNA. Esta distribución de los datos es:

Tabla 70:

Distribución de los registros de la data para la elaboración y probar los modelos de RNA para predecir la resistencia a la compresión del concreto.

N°	Descripción	Numero de registros para elaborar los modelos de RNA	Numero de registros para probar los modelos de RNA
1	ACI Concreto Normal	9	-
2	MF Concreto Normal	9	-
3	W Concreto Normal	9	-
4	ACI MEPS T110 5%	9	-
5	ACI MEPS T110 15%	-	9
6	ACI MEPS T110 30%	9	-
7	MF MEPS T110 5%	9	-
8	MF MEPS T110 15%	9	-
9	MF MEPS T110 30%	9	-
10	W MEPS T110 5%	9	-
11	W MEPS T110 15%	9	-
12	W MEPS T110 30%	9	-
13	ACI MEPS T130 5%	9	-
14	ACI MEPS T130 10%	9	-
15	ACI MEPS T130 15%	9	-
16	MF MEPS T130 5%	-	9
17	MF MEPS T130 10%	9	-
18	MF MEPS T130 15%	9	-
19	W MEPS T130 5%	9	-
20	W MEPS T130 10%	9	-
21	W MEPS T130 15%	9	-
22	ACI MEPS T145 5%	9	-
23	ACI MEPS T145 10%	9	-

24	ACI MEPS T145 15%	9	-
25	MF MEPS T145 5%	9	-
26	MF MEPS T145 10%	9	-
27	MF MEPS T145 15%	9	-
28	W MEPS T145 5%	9	-
29	W MEPS T145 10%	-	9
30	W MEPS T145 15%	9	-
Sub Total		243	27
Total		270	

Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo.

En la Tabla 70, se puede ver la distribución de los registros para la elaboración y la prueba de la RNA, distribuyéndolos para la elaboración y probar los modelos de RNA.

Los 243 registros con 17 variables cada una fueron agrupados en una matriz de 243x17 los cuales se muestran en el ANEXO 02. Los restantes 27 registros cada uno con 17 variables, se agruparon en una matriz de 27x17 los cuales son mostrados en el ANEXO 03.

Las 17 variables descritas para la elaboración y validación de la RNA se muestran a continuación de la siguiente manera:

Tabla 71:

Selección de las variables utilizadas para la predicción de la resistencia a la compresión del concreto utilizando Redes Neuronales Artificiales.

Grupo	Descripción	Variable	Unidad	Representación de datos para la RNA
Métodos de diseño de mezcla	Métodos de diseño de mezcla	ACI - 211		[1 0 0]
		Módulo de fineza Walker	-	[0 1 0]
				[0 0 1]
Cemento	Cemento	Cantidad	kg/m ³	Numérica real
Agregados	Agregado Fino	Cantidad	kg/m ³	Numérica real
	Agregado Grueso	Cantidad	kg/m ³	Numérica real
Agua	Agua	Cantidad	lt/m ³	Numérica real

Esferas de poliestireno expandido modificado	Esferas de poliestireno expandido modificado MEPS	Cantidad	kg/m ³	Numérica real
	Porcentaje de Volumen de MEPS en el concreto	Grados centígrados	°C	Numérica real
	Temperatura de los MEPS	Porcentaje	%	Numérica real
	Peso específico de MEPS	Cantidad	kg/m ³	Numérica real
	Diametro de los MEPS	Cantidad	mm	Numérica real
Edad del concreto	Días	Días	días	Numérica real
Propiedades del concreto endurecido	Absorción del Concreto	Porcentaje	%	Numérica real
	Peso específico del Concreto	Cantidad	kg/m ³	Numérica real
	Volumen de vacíos del concreto	Porcentaje	%	Numérica real
Propiedades a predecir	Resistencia a la compresión	Resistencia a la compresión	kg/m ²	Numérica real

Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo.

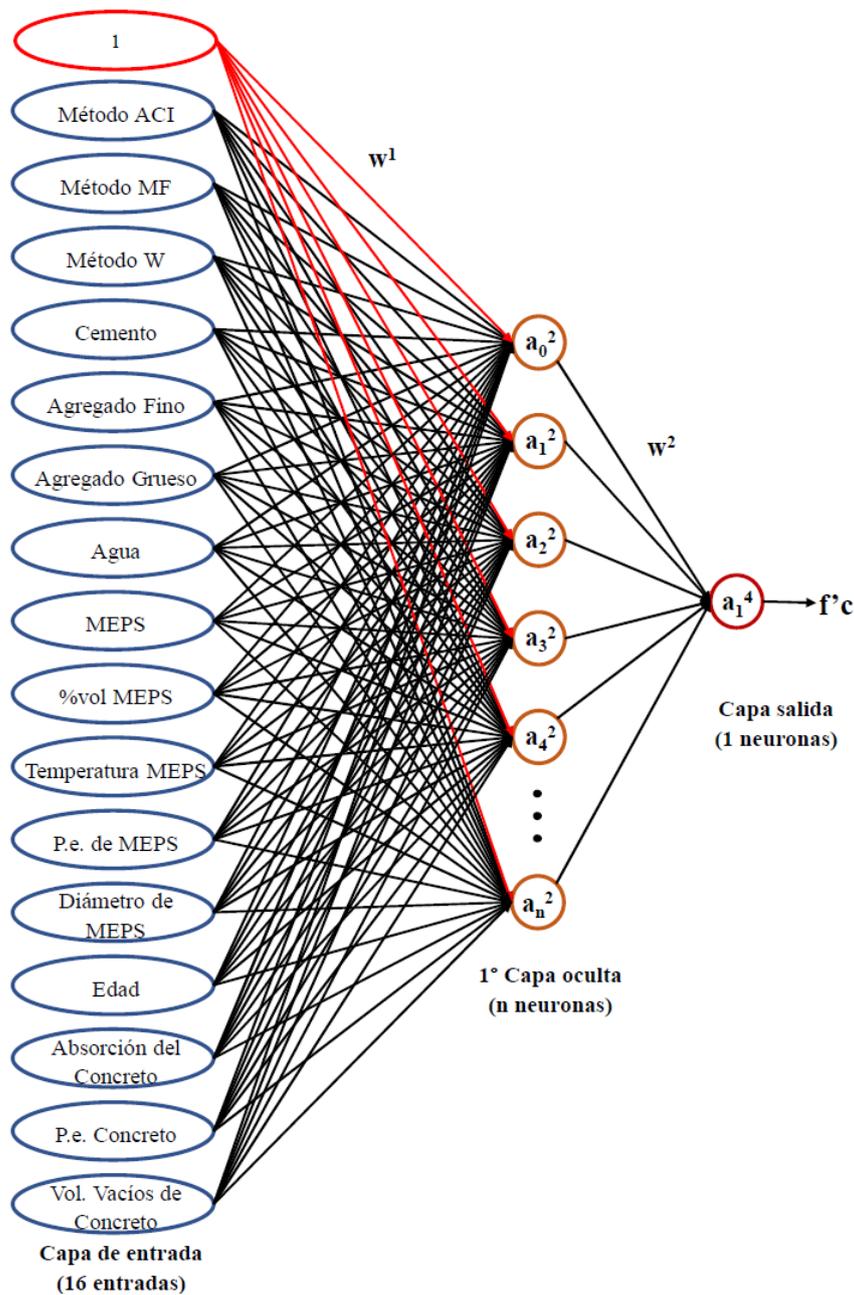
En la tabla 71, se muestra la agrupación de las variables de entrada para la RNA para la predicción de la resistencia a compresión de la siguiente manera: método de diseño, cemento, agregados, agua, esferas de poliestireno expandido modificado MEPS, edad del concreto, densidad del concreto, absorción del concreto, volumen de vacíos del concreto y resistencia a la compresión del concreto. Siendo esta ultima la propiedad a predecir.

3.10.1.2 Arquitectura para la RNA para la resistencia a la compresión.

Para elaborar las RNA para la predicción de la resistencia a compresión del concreto se utilizó el “Perceptrón Multicapa”, la cual consta de una arquitectura de capas de entrada, capas ocultas y salida, a su vez se definió el número de neuronas y un tipo de conexión hacia adelante (feedforward). Utilizando una función de transferencia entre la capa de entrada y capa oculta de tangente sigmoidea.

Figura 62:

Esquema de red neuronal empleada para la resistencia a compresión.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

En la figura 62, se presentan la arquitectura de perceptrón multicapa con conexión hacia adelante utilizada en la elaboración de las RNA, esta consta una capa de entrada con 16 variables de entrada, una capa oculta compuesta por neuronas y con una capa de salida con contiene la variable a predecir.

Se elaboraron cuatro modelos de RNA para su arquitectura estas se muestran a continuación:

Tabla 72:

Planteamientos de variables de entrada y salida para RNA para predicción de resistencia a compresión del concreto.

RNA	Capa Entrada	Capa Oculta	Capa Salida
RNA_Fc_A	DisenoACI, DisenoMF, DisenoW, Cemento, AgFino, AgGrueso, Agua, MEPS, VolMEPS, TempMEPS, PeMEPS, DiametroMEPS, Edad, AbsConcreto, PeConcreto, VolVaciosConcreto	1	Fc
RNA_Fc_B	DisenoACI, DisenoMF, DisenoW, Cemento, AgFino, AgGrueso, Agua, MEPS, VolMEPS, TempMEPS, PeMEPS, DiametroMEPS, Edad.	1	Fc
RNA_Fc_C	Cemento, AgFino, AgGrueso, Agua, MEPS, VolMEPS, TempMEPS, PeMEPS, DiametroMEPS, Edad.	1	Fc
RNA_Fc_D	Cemento, AgFino, AgGrueso, Agua, MEPS, TempMEPS, PeMEPS, Edad.	1	Fc

Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo

En la tabla 72, se puede ver el planteamiento de los 4 modelos de redes neuronales artificiales cada una con sus variables de entrada seleccionadas de acuerdo a su incidencia en la resistencia a compresión del concreto.

Para le cálculo del número de neuronas en la capa oculta no hay una regla definida establecida, pero si hay recomendaciones por la bibliografía (González et al., 2012) para lo cual se toma los valores mínimos y se va incrementando hasta obtener los mejores resultados. Dichos valores se calcularon de acuerdo a las siguientes expresiones.

$$NNCOmin = \text{Redondeo} (\sqrt{S_1 S_2})$$

$$NNCOmax = 2 \times S_1 + 1$$

Donde:

NNCOmin = Número mínimo de neuronas en las capas ocultas

NNCOmax = Número máximo de neuronas en las capas ocultas

S_1 = Numero de variables en la capa de entrada.

S_2 = Numero de variables en la capa de salida.

Tabla 73:

Numero de neuronas en las capas ocultas para cada una de las redes neuronales.

RNA	Numero de variables capas de entrada (S_1)	Numero de variables capas de salida (S_2)	Numero minimo de neuronas por capas ocultas (NNCOmin)	Numero maximo de neuronas por capas ocultas (NNCOmax)
RNA_Fc_A	16	1	4	33
RNA_Fc_B	13	1	4	27
RNA_Fc_C	10	1	3	21
RNA_Fc_D	8	1	3	17

Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo

En la tabla 73, se puede observar el rango mínimo y máximo de neuronas en las capas ocultas para cada uno de los cuatro modelos RNA_Fc_A, RNA_Fc_B, RNA_Fc_C y RNA_Fc_D.

3.10.1.3 Entrenamiento de las RNA para resistencia a la compresión.

Los datos seleccionados previamente para las variables de entrada y salida fueron divididos en porcentajes: 70% para entrenamiento, 15% para validación y 15% para test. Para el entrenamiento se utilizó la función Levenberg-Marquardt backpropagation (TRAINLM) para cada una de las RNA mostradas a continuación:

Tabla 74:

Características principales para el entrenamiento de RNA para predicción de la resistencia a la compresión del concreto.

Entrenamiento de Redes Neuronales Artificiales RNA				
Red Neuronal Artificial	RNA_Slump_A	RNA_Slump_B	RNA_Slump_C	RNA_Slump_D
Arquitectura	Perceptrón Multicapa	Perceptrón Multicapa	Perceptrón Multicapa	Perceptrón Multicapa
Tipo de conexión	Feed-forward (Hacia adelante)	Feed-forward (Hacia adelante)	Feed-forward (Hacia adelante)	Feed-forward (Hacia adelante)
Capas ocultas	1	1	1	1
VARIABLES DE ENTRADA	16	13	10	10
Neuronas en la capa oculta	Desde 4 hasta 33 neuronas	Desde 4 hasta 27 neuronas	Desde 3 hasta 21 neuronas	Desde 3 hasta 21 neuronas
VARIABLES DE SALIDA	1	1	1	1
Función de activación	Tangente sigmoideal	Tangente sigmoideal	Tangente sigmoideal	Tangente sigmoideal
Algoritmo de aprendizaje	Supervisado	Supervisado	Supervisado	Supervisado
Tipo de aprendizaje	Aprendizaje por corrección de error			
Función de entrenamiento	TRAINLM (Levenberg-Marquardt backpropagation)	TRAINLM (Levenberg-Marquardt backpropagation)	TRAINLM (Levenberg-Marquardt backpropagation)	TRAINLM (Levenberg-Marquardt backpropagation)
Salida	Resistencia a la compresión f'c			

Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo

En la tabla 74, se puede ver las características principales para los cuatro modelos de RNA con una variación solamente en las variables de entrada.

Una vez definido los parámetros de entrenamiento se procedió con la elaboración de los modelos para lo cual se utilizó los 243 registros almacenados en el ANEXO 02,

estos fueron divididos en entrenamiento 70%, para validación 15% y para el test 15% de manera aleatoria.

3.10.1.4 Elaboración de modelos de RNA en Matlab.

Para la elaboración de los cuatro modelos de RNA se utilizó el lenguaje de programación Matlab con su caja de herramientas (Neural Network Toolbox). Para lo cual se desarrolló un código principal que llama a diferentes funciones como son funciones de cargar datos, función para crear una red neuronal con una capa oculta, función para extraer los pesos de la red neuronal, estos son organizados como se muestra a continuación:

- Función Cargar datos.
 - Función para cargar datos 16 variables de entrada.
 - Función para cargar datos 13 variables de entrada.
 - Función para cargar datos 10 variables de entrada.
 - Función para cargar datos 8 variables de entrada.
- Función para crear RNA con una capa oculta.
- Función para extraer los pesos de la capa oculta y bias.
- Código principal para la elaboración de las RNA en la predicción de la resistencia a compresión del concreto.
- Código para prueba de la RNA para predecir la resistencia a la compresión.

Seguidamente se presenta el código utilizado para cada una de las funciones definidas y el código principal.

3.10.1.4.1 Función para cargar datos de acuerdo al número de variables de entrada

3.10.1.4.1.1 Función para cargar datos (*Cargar_Datos_16V.m*)

Esta función está en cargada de transferir los datos almacenados en hoja de cálculo hacia el entorno de Matlab en forma de matriz. Creando dos matrices denominadas



entrada y salida, la matriz entrada recibe las 16 variables cada una con sus registros.

Mientras que la matriz salida recibe una variable con sus registros. A continuación, se presenta la codificación de la función en la cual se describe su proceso.

Código 1:

Función para cargar 16 variables de entrada.

Función (Cargar_Datos_16V.m)

```
%% = Función para cargar 16 variables de entrada =  
%Función para cargar datos de la hoja de cálculo en formato Excel (.xlsx)  
%Retorna los valores en Matrices de entrada y Salida  
function [Entrada_Datos, Salida_Datos]= Cargar_Datos_16V(Nombre_archivo)  
warning ('off')  
%Identifica el nombre del archivo y las descripciones en texto de cada columna en formato  
xlsx  
Training_Dataset = Nombre_archivo;  
Training_Dataset_Options = detectImportOptions(Training_Dataset);  
Training_Data = readtable(Training_Dataset,Training_Dataset_Options,'UseExcel', false)  
  
%Se asignan los atributos de cada columna y se guardan los datos en vectores asignados para  
formar la matriz de data para la realización de la RNA con 16 variables de entrada  
  
DisenoACI_Dato = Training_Data.DisenoACI;  
DisenoMF_Dato = Training_Data.DisenoMF;  
DisenoW_Dato = Training_Data.DisenoW;  
Cemento_Dato = Training_Data.Cemento;  
AgFino_Dato = Training_Data.AgFino;  
AgGrueso_Dato = Training_Data.AgGrueso;  
Agua_Dato = Training_Data.Agua;  
MEPS_Dato = Training_Data.MEPS;  
VolMEPS_Dato = Training_Data.VolMEPS;  
TempMEPS_Dato = Training_Data.TempMEPS;  
PeMEPS_Dato = Training_Data.PeMEPS;  
DiametroMEPS_Dato = Training_Data.DiametroMEPS;  
Edad_Dato = Training_Data.Edad;  
AbsConcreto_Dato = Training_Data.AbsConcreto;  
PeConcreto_Dato = Training_Data.PeConcreto;  
VolVaciosConcreto_Dato = Training_Data.VolVaciosConcreto;  
  
%Se crea la matriz con los vectores de entrada extraídos por columna y se guarda en la matriz  
Entrada.  
Entrada_Datos = [DisenoACI_Dato, DisenoMF_Dato, DisenoW_Dato, Cemento_Dato,  
AgFino_Dato, AgGrueso_Dato, Agua_Dato, MEPS_Dato, VolMEPS_Dato,  
TempMEPS_Dato, PeMEPS_Dato,DiametroMEPS_Dato ,Edad_Dato, AbsConcreto_Dato,  
PeConcreto_Dato, VolVaciosConcreto_Dato]  
  
%Se crea la matriz con el vector extraídos en la columna de los valores de salida y se guarda  
en la matriz salida.
```

```
Salida_Datos = Training_Data.FcReal;  
  
end
```

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

3.10.1.4.1.2 Función para cargar datos (*Cargar_Datos_13V.m*)

Esta función está encargada de transferir los datos almacenados en hoja de cálculo hacia el entorno de Matlab en forma de matriz. Creando dos matrices denominadas entrada y salida, la matriz entrada recibe las 13 variables cada una con sus registros. Mientras que la matriz salida recibe una variable con sus registros. A continuación, se presenta la codificación de la función en la cual se describe su proceso.

Código 2:

Función para cargar 13 variables de entrada.

Función (Cargar_Datos_13V.m)

```
%% = Función para cargar 13 variables de entrada =  
%Función para cargar datos de la hoja de cálculo en formato Excel (.xlsx)  
%Retorna los valores en Matrices de entrada y Salida  
function [Entrada_Datos, Salida_Datos]= Cargar_datos_13v(Nombre_archivo)  
warning ('off')  
%Identifica el nombre del archivo y las descripciones en texto de cada columna en formato  
xlsx  
Training_Dataset = Nombre_archivo;  
Training_Dataset_Options = detectImportOptions(Training_Dataset);  
Training_Data = readtable(Training_Dataset,Training_Dataset_Options,'UseExcel', false)  
  
%Se asignan los atributos de cada columna y se guardan los datos en vectores asignados para  
formar la matriz de data para la realización de la RNA con 13 variables de entrada  
  
DisenoACI_Dato = Training_Data.DisenoACI;  
DisenoMF_Dato = Training_Data.DisenoMF;  
DisenoW_Dato = Training_Data.DisenoW;  
Cemento_Dato = Training_Data.Cemento;  
AgFino_Dato = Training_Data.AgFino;  
AgGrueso_Dato = Training_Data.AgGrueso;  
Agua_Dato = Training_Data.Agua;  
MEPS_Dato = Training_Data.MEPS;  
VolMEPS_Dato = Training_Data.VolMEPS;  
TempMEPS_Dato = Training_Data.TempMEPS;  
PeMEPS_Dato = Training_Data.PeMEPS;  
DiametroMEPS_Dato = Training_Data.DiametroMEPS;  
Edad_Dato = Training_Data.Edad;
```



```
%Se crea la matriz con todos los vectores de entrada para la Red Neuronal extraídos por
columna y se guarda en la matriz Entrada.
Entrada_Datos = [DisenoACI_Dato, DisenoMF_Dato, DisenoW_Dato, Cemento_Dato,
AgFino_Dato, AgGrueso_Dato, Agua_Dato, MEPS_Dato, VolMEPS_Dato,
TempMEPS_Dato, PeMEPS_Dato,DiametroMEPS_Dato ,Edad_Dato]

%Se crea la matriz con el vector extraídos en la columna de los valores de salida y se guarda
en la matriz salida.
Salida_Datos = Training_Data.FcReal;

end
```

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

3.10.1.4.1.3 Función para cargar datos (*Cargar_Datos_10V.m*)

Esta función está en cargada de transferir los datos almacenados en hoja de cálculo hacia el entorno de Matlab en forma de matriz. Creando dos matrices denominadas entrada y salida, la matriz entrada recibe las 10 variables cada una con sus registros. Mientras que la matriz salida recibe una variable con sus registros. A continuación, se presenta la codificación de la función en la cual se describe su proceso.

Código 3:

Función para cargar 10 variables de entrada.

```
Función (Cargar_Datos_10V.m)

%% = Función para cargar 10 variables de entrada =
%Función para cargar datos de la hoja de cálculo en formato Excel (.xlsx)
%Retorna los valores en Matrices de entrada y Salida
function [Entrada_Datos, Salida_Datos]= Cargar_datos_10v(Nombre_archivo)
warning ('off')
%Identifica el nombre del archivo y las descripciones en texto de cada columna en formato
xlsx
Training_Dataset = Nombre_archivo;
Training_Dataset_Options = detectImportOptions(Training_Dataset);
Training_Data = readtable(Training_Dataset,Training_Dataset_Options,'UseExcel', false)

%Se asignan los atributos de cada columna y se guardan los datos en vectores asignados para
formar la matriz de data para la realización de la RNA con 10 variables de entrada

Cemento_Dato = Training_Data.Cemento;
AgFino_Dato = Training_Data.AgFino;
AgGrueso_Dato = Training_Data.AgGrueso;
Agua_Dato = Training_Data.Agua;
MEPS_Dato = Training_Data.MEPS;
VolMEPS_Dato = Training_Data.VolMEPS;
TempMEPS_Dato = Training_Data.TempMEPS;
```



```
PeMEPS_Dato = Training_Data.PeMEPS;  
DiametroMEPS_Dato = Training_Data.DiametroMEPS;  
Edad_Dato = Training_Data.Edad;  
  
%Se crea la matriz con todos los vectores de entrada para la Red Neuronal extraídos por  
columna y se guarda en la matriz Entrada.  
Entrada_Datos = [Cemento_Dato, AgFino_Dato, AgGrueso_Dato, Agua_Dato, MEPS_Dato,  
VolMEPS_Dato, TempMEPS_Dato, PeMEPS_Dato,DiametroMEPS_Dato ,Edad_Dato]  
  
%Se crea la matriz con el vector extraídos en la columna de los valores de salida y se guarda  
en la matriz salida.  
Salida_Datos = Training_Data.FcReal;  
  
end
```

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

3.10.1.4.1.4 Función para cargar datos (Cargar_Datos_8V.m)

Esta función está en cargada de transferir los datos almacenados en hoja de cálculo hacia el entorno de Matlab en forma de matriz. Creando dos matrices denominadas entrada y salida, la matriz entrada recibe las 8 variables cada una con sus registros. Mientras que la matriz salida recibe una variable con sus registros. A continuación, se presenta la codificación de la función en la cual se describe su proceso.

Código 4:

Función para cargar 8 variables de entrada.

```
Función (Cargar_Datos_8V.m)  
  
%% = Función para cargar 8 variables de entrada =  
%Función para cargar datos de la hoja de cálculo en formato Excel (.xlsx)  
%Retorna los valores en Matrices de entrada y Salida  
function [Entrada_Datos, Salida_Datos]= Cargar_datos_8v(Nombre_archivo)  
warning ('off')  
%Identifica el nombre del archivo y las descripciones en texto de cada columna en formato  
xlsx  
Training_Dataset = Nombre_archivo;  
Training_Dataset_Options = detectImportOptions(Training_Dataset);  
Training_Data = readtable(Training_Dataset,Training_Dataset_Options,'UseExcel', false)  
  
%Se asignan los atributos de cada columna y se guardan los datos en vectores asignados para  
formar la matriz de data para la realización de la RNA con 8 variables de entrada  
  
Cemento_Dato = Training_Data.Cemento;  
AgFino_Dato = Training_Data.AgFino;  
AgGrueso_Dato = Training_Data.AgGrueso;  
Agua_Dato = Training_Data.Agua;
```



```
MEPS_Dato = Training_Data.MEPS;  
TempMEPS_Dato = Training_Data.TempMEPS;  
PeMEPS_Dato = Training_Data.PeMEPS;  
Edad_Dato = Training_Data.Edad;  
  
%Se crea la matriz con todos los vectores de entrada para la Red Neuronal extraídos por  
columna y se guarda en la matriz Entrada.  
Entrada_Datos = [Cemento_Dato, AgFino_Dato, AgGrueso_Dato, Agua_Dato, MEPS_Dato,  
TempMEPS_Dato, PeMEPS_Dato, Edad_Dato]  
  
%Se crea la matriz con el vector extraídos en la columna de los valores de salida y se guarda  
en la matriz salida.  
Salida_Datos = Training_Data.FcReal;  
  
end
```

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

3.10.1.4.2 Función para crear RNA con una capa oculta

Esta función se encarga de la elaboración de una RNA con una capa oculta para lo cual recibe los valores de las matrices de entrada, salida y el número de neuronas para la capa oculta. Una vez recibe los parámetros se comienza la creación de la RNA definiendo una arquitectura perceptrón multicapa con una conexión hacia adelante Feedforward con una función de transferencia tangente sigmoideal. Para el entrenamiento utiliza la función TRAINLM (Levenberg-Marquardt backpropagation) con sus respectivos parámetros. Una vez definido la configuración de la red neuronal se procede a entrenar, validar y test de la RNA. Para la validación se definió el uso del error cuadrático medio (MSE) el cual se obtiene de la diferencia entre el valor real y el valor predicho elevado al cuadrado. A continuación, se presenta la codificación de la función en la cual se describe su proceso.

Código 5:

Función RNA con una capa oculta.

```
Función (RNA_FC_con_una_CapaOculta.m)  
  
%% == Función Entrenando la red RNA_FC_con_una_CapaOculta ==  
  
function [Prediccion, tr, valRatio] = RNA_FC_con_una_CapaOculta(Entrada_Datos,  
Salida_Datos, Neuronas_capaoculta)
```



```
%entrenar la Red Neuronal como: trainlm, trainbr, trainscg
Algoritmo_De_Aprendizaje = 'trainlm';
%Asignacion de las dos capas ocultas a la RNA
Arquitectura_Red = [Neuronas_capaoculta];

%inicializando creando la red neuronal con retro propagación hacia atrás
RNA_FC_con_una_CapaOculta= feedforwardnet(Arquitectura_Red,
Algoritmo_De_Aprendizaje);

%Parámetro para la red neuronal
RNA_FC_con_una_CapaOculta.trainParam.epochs = (1000); %Numero de épocas máximas
RNA_FC_con_una_CapaOculta.trainParam.max_fail = 200; %Máximo de errores de
validación
RNA_FC_con_una_CapaOculta.trainParam.min_grad = 1e-7; %Gradiente mínimo de
rendimiento
RNA_FC_con_una_CapaOculta.trainParam.mu=0.001; %Factor de aprendizaje para
modificar los pesos iniciales
RNA_FC_con_una_CapaOculta.trainParam.mu_dec=0.1; %Factor de aprendizaje decreciente
RNA_FC_con_una_CapaOculta.trainParam.mu_inc=10; %Factor de aprendizaje creciente
RNA_FC_con_una_CapaOculta.trainParam.showWindow=true;

%Selección de la performance de la Red neuronal utilizando el error cuadrático medio (MSE)
RNA_FC_con_una_CapaOculta.performFcn='mse';

%Función de activación tangente sigmooidal para la capa oculta
RNA_FC_con_una_CapaOculta.layers{1}.transferFcn = 'tansig';

%Configuración de la red neuronal
configure (RNA_FC_con_una_CapaOculta,Entrada_Datos,Salida_Datos)
%división de nuestros datos de entrenamiento en entrena miento 70%,validacion 15% y el test
15%
RNA_FC_con_una_CapaOculta.divideFcn = 'dividerand';
RNA_FC_con_una_CapaOculta.divideMode = 'sample';
RNA_FC_con_una_CapaOculta.divideParam.trainRatio = 70/100;
RNA_FC_con_una_CapaOculta.divideParam.testRatio = 15/100;
RNA_FC_con_una_CapaOculta.divideParam.valRatio = 15/100;

%Reporte en gráficos del performance, estado de entrenamiento, test y validación de la Red
neuronal artificial
RNA_FC_con_una_CapaOculta.plotFcns = {'plotperform', 'plottrainstate', 'ploterrhist',
'plotregression'};

%Valores de predicción de la Red Neuronal Artificial almacenados en la matriz Predicción.
[Prediccion, tr] = train(RNA_FC_con_una_CapaOculta, Entrada_Datos, Salida_Datos);

end
```

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

3.10.1.4.3 Función para extraer los pesos de la capa oculta y bias.

La función se encarga de la extracción de los valores de los pesos de la capa oculta y el bias, para lo cual primeramente recibe el nombre de la RNA a la que se le va extraer

los pesos y estos serán almacenados en las variables w_1 , w_2 , b_1 y b_2 . A continuación, se presenta la codificación de la función en la cual se describe su proceso.

Código 6:

Función extraer pesos capa oculta.

Función (Extrae_Pesos_capa_oculta.m)

```
function [w1,w2,b1,b2] = Extrae_Pesos_CapaOculta(red)
%extraccion de los pesos de la capa oculta LW y almacenada w1
w1=red.IW{1,1}
%extraccion de los pesos de la capa oculta LW y almacenada w1
w2=red.LW{2,1}
%extraccion de los pesos del bias b{1} y almacenada b1
b1=red.b{1}
%extraccion de los pesos del bias b{2} y almacenada b2
b2=red.b{2}
end
```

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

3.10.1.4.4 Código principal para la elaboración de las RNA en la predicción de la resistencia a compresión del concreto.

El código principal es el encargado de crear las diferentes RNA para lo cual primero se selecciona el número de variables de entrada que son 16, 13, 10 y 8 una vez seleccionada se cargan los datos para la elaboración y prueba de la RNA, luego se define el número de capas en la capa oculta de acuerdo a si valor máximo y mínimo. Seguidamente se utilizará la función para la creación de la RNA, una vez creada procede la extracción de los pesos de la capa oculta, para posteriormente con los datos de prueba probar la efectividad de la RNA. A continuación, se presenta el código principal el cual se describe el proceso paso a paso.

Código 7:

Código principal para creación de las RNA para la predicción de la resistencia a la compresión del concreto.



Código Principal para creación de las Redes Neuronales para la predicción de la resistencia a la compresión del concreto (RNA_Principal.m)

```
clear; clc;
fprintf('\nOpciones de variables de entrada\n');
fprintf('\nPresione 1 para 16 variables de entrada\n');
fprintf('\nPresione 2 para 13 variables de entrada\n');
fprintf('\nPresione 3 para 10 variables de entrada\n');
fprintf('\nPresione 4 para 8 variables de entrada\n');
Numero_Entradas=input('\nSeleccione el número de variables de entrada de acuerdo a las
opciones ..... \n');
switch Numero_Entradas
case 1
    fprintf('\nSe utilizara el modelo de RNA_Fc_A con 16 variables de entrada\n');

    fprintf('\nCargar los datos para la elaboración de la RNA\n');
    %Se cargan los datos de la matriz 189x16 usando función Cargar_Datos_16V.m los
    cuales nos servirán para la elaboración de la RNA asignando los valores en las Entradas
    y en salidas
    [V_Entrada, V_Salida]= Cargar_Datos_16V('Crear_RNA.xlsx');

    %Ingrese mediante el teclado el número de neuronas en la capa oculta
    fprintf('\nIngrese el número de neuronas en la capa oculta\n');
    fprintf('\nComo mínimo 4 neuronas y como máximo 33 neuronas\n');

    Neuronas_capa_oculta=input('\nIngrese Numero de neuronas de la capa oculta ..... \n');
    minVal = 4;
    maxVal = 33;

    if (Neuronas_capa_oculta >= minVal) & (Neuronas_capa_oculta <= maxVal)
        disp('El número de neuronas en la capa oculta se encuentran dentro del rango
        especificado.')

        fprintf('\nCreación de la Red Neuronal Artificial con una capa oculta ..... \n')
        %Se crea la RNA con la matriz de entrada, salida y numero de neuronas en la capa
        oculta utilizando la función RNA_FC_con_una_CapaOculta
        [RNA_Fc_A, tr] = RNA_FC_con_una_CapaOculta(V_Entrada, V_Salida,
        Neuronas_capa_oculta)

        fprintf('\nExtracción de los pesos de la capa oculta y el bias Red neuronal artificial
        Red_Neuronal_1 ..... \n')
        %Se extrae los pesos de las capas ocultas y de los bias
        [w1,w2,b1,b2] = Extrae_Pesos_CapaOculta(RNA_Fc_A)

        fprintf('\nGuardado de la RNA ..... \n')
        %Se guarda la red neuronal
        save RNA_FC_A

    elseif (Neuronas_capa_oculta > maxVal)
        disp('El número de neuronas en la capa oculta supera el valor máximo.')
    else
        disp('El número de neuronas en la capa oculta supera el valor mínimo.')
    end
end
```



case 2

```
fprintf("\nSe utilizara el modelo de RNA_Fc_B con 13 variables de entrada\n");

fprintf("\nPresione enter para cargar los datos para la elaboracion de la RNA\n");
%Se cargan los datos de la matriz 189x13 usando función Cargar_Datos_13V.m los
cuales nos servirán para la elaboración de la RNA asignando los valores en las Entradas
y en salidas
[V_Entrada, V_Salida]= Cargar_Datos_13V('Crear_RNA.xlsx');

%Ingrese mediante el teclado el número de neuronas en la capa oculta
fprintf("\nIngrese el número de neuronas en la capa oculta\n");
fprintf("\nComo mínimo 4 neuronas y como máximo 27 neuronas\n");

Neuronas_capa_oculta=input("\nIngrese Numero de neuronas de la capa oculta ..... \n");
minVal = 4;
maxVal = 27;

if (Neuronas_capa_oculta >= minVal) & (Neuronas_capa_oculta <= maxVal)
    fprintf("\nCreacion de la Red Neuronal Artificial con una capa oculta ..... \n')
    %Se crea la RNA con la matriz de entrada, salida y numero de neuronas en la capa
    oculta utilizando la función RNA_FC_con_una_CapaOculta
    [RNA_Fc_B, tr] = RNA_FC_con_una_CapaOculta(V_Entrada, V_Salida,
    Neuronas_capa_oculta)

    fprintf("\nExtracción de los pesos de la capa oculta y el bias Red neuronal artificial
    Red_Neuronal_1 ..... \n')
    %Se extrae los pesos de las capas ocultas y de los bias
    [w1,w2,b1,b2] = Extrae_Pesos_CapaOculta(RNA_Fc_B)

    fprintf("\nGuardado de la RNA ..... \n')
    %Se guarda la red neuronal
    save RNA_FC_B
elseif (Neuronas_capa_oculta > maxVal)
    disp('El número de neuronas en la capa oculta supera el valor máximo.')
else
    disp('El número de neuronas en la capa oculta supera el valor minimo.')
end
```

case 3

```
fprintf("\nSe utilizara el modelo de RNA_Fc_C con 10 variables de entrada\n");

fprintf("\nPresione enter para cargar los datos para la elaboración de la RNA\n");
%Se cargan los datos de la matriz 189x10 usando función Cargar_Datos_10V.m los
cuales nos servirán para la elaboración de la RNA asignando los valores en las Entradas
y en salidas
[V_Entrada, V_Salida]= Cargar_Datos_10V('Crear_RNA.xlsx');

%Ingrese mediante el teclado el número de neuronas en la capa oculta
fprintf("\nIngrese el número de neuronas en la capa oculta\n");
fprintf("\nComo mínimo 3 neuronas y como máximo 21 neuronas\n");

Neuronas_capa_oculta=input("\nIngrese Numero de neuronas de la capa oculta ..... \n");
minVal = 3;
maxVal = 21;
```



```
if (Neuronas_capa_oculta >= minVal) & (Neuronas_capa_oculta <= maxVal)
    fprintf('\nCreación de la Red Neuronal Artificial con una capa oculta ..... \n')
    %Se crea la RNA con la matriz de entrada, salida y numero de neuronas en la capa
    oculta utilizando la función RNA_FC_con_una_CapaOculta
    [RNA_Fc_C, tr] = RNA_FC_con_una_CapaOculta(V_Entrada, V_Salida,
    Neuronas_capa_oculta)

    fprintf('\nExtracción de los pesos de la capa oculta y el bias Red neuronal artificial
    Red_Neuronal_1 ..... \n')
    %Se extrae los pesos de las capas ocultas y de los bias
    [w1,w2,b1,b2] = Extrae_Pesos_CapaOculta(RNA_Fc_C)

    fprintf('\nGuardado de la RNA ..... \n')
    %Se guarda la red neuronal
    save RNA_FC_C
elseif (Neuronas_capa_oculta > maxVal)
    disp('El número de neuronas en la capa oculta supera el valor máximo.')
else
    disp('El número de neuronas en la capa oculta supera el valor mínimo.')
end
case 4
    fprintf('\nSe utilizara el modelo de RNA_Fc_A con 8 variables de entrada\n');

    fprintf('\nPresione enter para cargar los datos para la elaboración de la RNA\n');
    %Se cargan los datos de la matriz 189x8 usando función Cargar_Datos_8V.m los cuales
    nos servirán para la elaboración de la RNA asignando los valores en las Entradas y en
    salidas
    [V_Entrada, V_Salida]= Cargar_Datos_8V('Crear_RNA.xlsx');

    %Ingrese mediante el teclado el número de neuronas en la capa oculta
    fprintf('\nIngrese el número de neuronas en la capa oculta\n');
    fprintf('\nComo mínimo 3 neuronas y como máximo 17 neuronas\n');

    Neuronas_capa_oculta=input('\nIngrese Numero de neuronas de la capa oculta ..... \n');
    minVal = 3;
    maxVal = 17;

    if (Neuronas_capa_oculta >= minVal) & (Neuronas_capa_oculta <= maxVal)

        fprintf('\nCreación de la Red Neuronal Artificial con una capa oculta ..... \n')
        %Se crea la RNA con la matriz de entrada, salida y numero de neuronas en la capa
        oculta utilizando la función RNA_FC_con_una_CapaOculta
        [RNA_Fc_D, tr] = RNA_FC_con_una_CapaOculta(V_Entrada, V_Salida,
        Neuronas_capa_oculta)

        fprintf('\nExtracción de los pesos de la capa oculta y el bias Red neuronal artificial
        Red_Neuronal_1 ..... \n')
        %Se extrae los pesos de las capas ocultas y de los bias
        [w1,w2,b1,b2] = Extrae_Pesos_CapaOculta(RNA_Fc_D)

        fprintf('\nGuardado de la RNA ..... \n')
        %Se guarda la red neuronal
        save RNA_FC_D
    elseif (Neuronas_capa_oculta > maxVal)
        disp('El número de neuronas en la capa oculta supera el valor máximo.')
```

```
else
    disp('El número de neuronas en la capa oculta supera el valor mínimo.')
end
end
```

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

3.10.1.4.5 Código para prueba de la RNA para predecir la resistencia a la compresión.

El código de prueba es el encargado de realizar predicciones utilizando los modelos de RNA elaborados para lo cual primeramente se deberá de adjuntar un archivo en XLSX con las variables de entrada que se deseen predecir.

Código 8:

Código para probar los modelos RNA_FC.

Código para probar los modelos RNA_FC (Prueba_RNA_FC.m)

```
fprintf('\nQue tipo de modelo de RNA se elaboró\n');
fprintf('\nPresione 1 para modelo RNA_FC_A de 16 Variables\n');
fprintf('\nPresione 2 para modelo RNA_FC_B de 13 Variables\n');
fprintf('\nPresione 3 para modelo RNA_FC_C de 10 Variables\n');
fprintf('\nPresione 4 para modelo RNA_FC_D de 8 Variables\n');
Numero_Entradas=input('\nSeleccione el modelo de acuerdo a las opciones ..... \n');
switch Numero_Entradas
case 1
    %%RNA para probar la RNA
    fprintf('\nPresione enter para cargar los datos para la prueba\n');
    %Se cargan los datos de la matriz usando la función Cargar_Datos_13V.m los cuales
    nos servirán para realizar la prueba de la RNA asignando los valores en las Entradas y
    en salidas
    [PruebaEntrada, PruebaSalida]= Cargar_Datos_16V('Prueba_RNA.xlsx');
    fprintf('\nPredicción de prueba de la fc del concreto con la RNA ..... \n')
    %Se guarda las predicciones de la RNA en "FC_Predicciones".
    PruebaSalida_Prediccion = RNA_Fc_A(PruebaEntrada)
case 2
    %%RNA para probar la RNA
    fprintf('\nPresione enter para cargar los datos para la prueba\n');
    %Se cargan los datos de la matriz usando la función Cargar_Datos_13V.m los cuales
    nos servirán para realizar la prueba de la RNA asignando los valores en las Entradas y
    en salidas
    [PruebaEntrada, PruebaSalida]= Cargar_Datos_13V('Prueba_RNA.xlsx');
    fprintf('\nPredicción de prueba de la fc del concreto con la RNA ..... \n')
    %Se guarda las predicciones de la RNA en "FC_Predicciones".
    PruebaSalida_Prediccion = RNA_Fc_B(PruebaEntrada)
case 3
    %%RNA para probar la RNA
    fprintf('\nPresione enter para cargar los datos para la prueba\n');
```



```
%Se cargan los datos de la matriz usando la función Cargar_Datos_13V.m los cuales  
nos servirán para realizar la prueba de la RNA asignando los valores en las Entradas y  
en salidas  
[PruebaEntrada, PruebaSalida]= Cargar_Datos_10V('Prueba_RNA.xlsx');  
fprintf('\nPredicción de prueba de la fc del concreto con la RNA ..... \n')  
%Se guarda las predicciones de la RNA en "FC_Predicciones".  
PruebaSalida_Prediccion = RNA_Fc_C(PruebaEntrada)  
case 4  
%%RNA para probar la RNA  
fprintf('\nPresione enter para cargar los datos para la prueba\n');  
%Se cargan los datos de la matriz usando la función Cargar_Datos_13V.m los cuales  
nos servirán para realizar la prueba de la RNA asignando los valores en las Entradas y  
en salidas  
[PruebaEntrada, PruebaSalida]= Cargar_Datos_8V('Prueba_RNA.xlsx');  
fprintf('\nPredicción de prueba de la fc del concreto con la RNA ..... \n')  
%Se guarda las predicciones de la RNA en "FC_Predicciones".  
PruebaSalida_Prediccion = RNA_Fc_D(PruebaEntrada)  
end
```

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

3.10.1.5 Validación y evaluación de modelos de RNA para la predicción de la resistencia a la compresión.

Para la validación y evaluación de los cuatro modelos de RNA se utiliza el error cuadrático medio MSE en todas las fases de elaboración de la RNA, seleccionando los modelos con número de neuronas en la capa oculta que tengan el menor error cuadrático MSE.

3.10.2 Red Neuronal Artificial para trabajabilidad del concreto.

3.10.2.1 Selección de la data para variables de entrada RNA

Se elaboró una base de datos a partir de los resultados de los ensayos de laboratorio de los materiales, proporciones en peso de materiales de los diseños de mezcla que influyeron en la trabajabilidad del concreto.

El total de los datos recolectados fueron 30 registros cada uno con 13 variables estos fueron almacenados en una base data. De los cuales se seleccionaron 80% del total de los datos correspondiente a 24 registros para el entrenamiento, validación y test; para la elaboración de la RNA, el restante 20% de la data corresponde a los 6 registros los



cuales fueron seleccionados de manera aleatoria y fueron utilizados para probar los modelos de RNA. Esta distribución de los datos se muestra a continuación:

Tabla 75:

Distribución de los registros de la data para la elaboración y probar los modelos de RNA para predecir la trabajabilidad del concreto.

N°	Descripción	Numero de registros para elaborar los modelos de RNA	Numero de registros para probar los modelos de RNA
1	ACI Concreto Normal	01	-
2	MF Concreto Normal	01	-
3	W Concreto Normal	01	-
4	ACI MEPS T110 5%	-	01
5	ACI MEPS T110 15%	01	-
6	ACI MEPS T110 30%	01	-
7	MF MEPS T110 5%	01	-
8	MF MEPS T110 15%	-	01
9	MF MEPS T110 30%	01	-
10	W MEPS T110 5%	01	-
11	W MEPS T110 15%	01	-
12	W MEPS T110 30%	01	-
13	ACI MEPS T130 5%	01	-
14	ACI MEPS T130 10%	-	01
15	ACI MEPS T130 15%	01	-
16	MF MEPS T130 5%	01	-
17	MF MEPS T130 10%	01	-
18	MF MEPS T130 15%	01	-
19	W MEPS T130 5%	-	01
20	W MEPS T130 10%	01	-
21	W MEPS T130 15%	01	-
22	ACI MEPS T145 5%	01	-
23	ACI MEPS T145 10%	01	-
24	ACI MEPS T145 15%	-	01
25	MF MEPS T145 5%	01	-
26	MF MEPS T145 10%	01	-
27	MF MEPS T145 15%	-	01
28	W MEPS T145 5%	01	-
29	W MEPS T145 10%	01	-
30	W MEPS T145 15%	01	-
Sub Total		24	6

Total

30

Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo

En la Tabla 75, se muestra la distribución de los registros para la elaboración y la prueba de la RNA, distribuyéndolos para la elaboración y probar los modelos de RNA.

Los 24 registros con 13 variables cada una fueron agrupados en una matriz de 24x13 los cuales se muestran en el ANEXO 02. Los restantes 6 registros cada uno con 13 variables cada uno se agruparon en una matriz de 6x13 los cuales son mostrados en el ANEXO 03.

Las 13 variables descritas para cada registro se muestran en la tabla 76 los cuales son agrupados de la siguiente manera:

Tabla 76:

Selección de las variables utilizadas para la predicción de la trabajabilidad del concreto utilizando Redes Neuronales Artificiales.

Grupo	Descripción	Variable	Unidad	Representación de datos para la RNA
Métodos de diseño de mezcla	Métodos de diseño de mezcla	ACI - 211		[1 0 0]
		Módulo de fineza	-	[0 1 0]
		Walker		[0 0 1]
Cemento	Cemento	Cantidad	kg/m ³	Numérica real
Agregados	Agregado Fino	Cantidad	kg/m ³	Numérica real
	Agregado Grueso	Cantidad	kg/m ³	Numérica real
Agua	Agua	Cantidad	lt/m ³	Numérica real
Esferas de poliestireno expandido modificado	Esferas de poliestireno expandido modificado MEPS	Cantidad	kg/m ³	Numérica real
	Porcentaje de Volumen de MEPS en el concreto	Grados centígrados	°C	Numérica real
	Temperatura de los MEPS	Porcentaje	%	Numérica real
	Peso específico de MEPS	Cantidad	kg/m ³	Numérica real



	Diametro de los MEPS	Cantidad	mm	Numérica real
Propiedades a predecir	Trabajabilidad del concreto SLUMP	Slump	Pulgadas	Numérica real

Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo

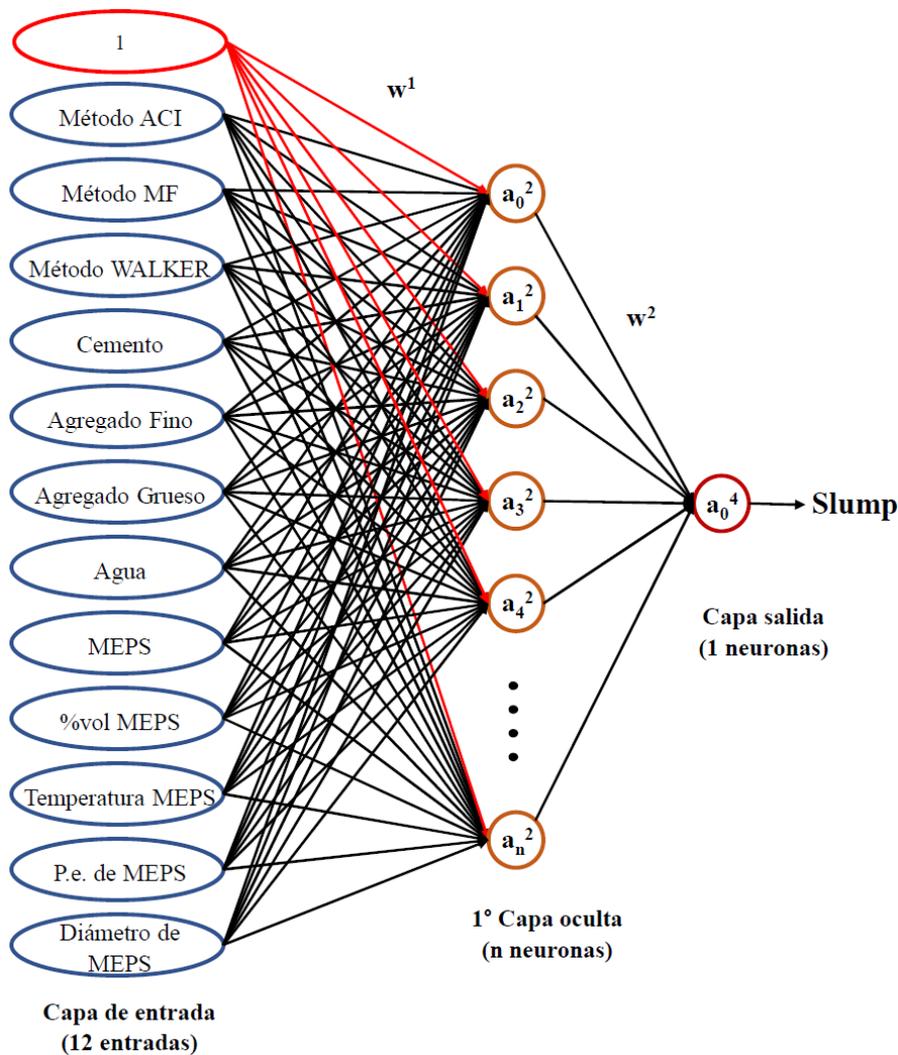
En la tabla 76, se muestra la agrupación de las variables de entrada para la RNA para la predicción de la trabajabilidad del concreto SLUMP de la siguiente manera: método de diseño, cemento, agregados, agua, esferas de poliestireno expandido modificado MEPS y trabajabilidad del concreto SLUMP. Siendo esta ultima la propiedad a predecir.

3.10.2.2 Arquitectura de la RNA para la trabajabilidad del concreto.

Para elaborar las RNA para la predicción de la resistencia a compresión del concreto se utilizó el “Perceptrón Multicapa”, la cual consta de una arquitectura de capas de entrada, capas ocultas y salida, a su vez se definió el número de neuronas y un tipo de conexión hacia adelante (feedforward). Utilizando una función de transferencia entre la capa de entrada y capa oculta de tangente sigmoidea.

Figura 63:

Esquema de red neuronal empleada para la trabajabilidad.



Fuente: Elaboración propia

En la figura 63, se presentan la arquitectura de perceptrón multicapa con conexión hacia adelante utilizada en la elaboración de las RNA, esta consta una capa de entrada con 12 variables de entrada, una capa oculta con neuronas en ella y una capa de salida con la variable a predecir.

Se elaboraron tres modelos de RNA para su arquitectura estas se muestran a continuación:

Tabla 77:

Planteamientos de variables de entrada y salida para RNA para predicción de trabajabilidad del concreto.

RNA	Capa Entrada	Capa Oculta	Capa Salida
RNA_S_A	DisenoACI, DisenoMF, DisenoW, Cemento, AgFino, AgGrueso, Agua, MEPS, VolMEPS, TempMEPS, PeMEPS, DiametroMEPS	1	Slump
RNA_S_B	Cemento, AgFino, AgGrueso, Agua, MEPS, VolMEPS, TempMEPS, PeMEPS, DiametroMEPS	1	Slump
RNA_S_C	Cemento, AgFino, AgGrueso, Agua, MEPS, TempMEPS.	1	Slump

Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo

En la tabla 77, se muestra el planteamiento de los 3 modelos de redes neuronales artificiales cada una con sus variables de entrada seleccionadas de acuerdo a su incidencia en la trabajabilidad del concreto SLUMP.

Para el cálculo del número de neuronas en la capa oculta no hay una regla definida establecida, pero si hay recomendaciones por la bibliografía (González et al., 2012) para lo cual se toma los valores mínimos y se va incrementando hasta obtener los mejores resultados. Dichos valores se calcularon de acuerdo a las siguientes expresiones.

$$NNCO_{min} = \text{Redondeo} (\sqrt{S_1 S_2})$$

$$NNCO_{max} = 2 \times S_1 + 1$$

Donde:

NNCO_{min} = Número mínimo de neuronas en las capas ocultas

NNCO_{max} = Número máximo de neuronas en las capas ocultas

S₁ = Numero de variables en la capa de entrada.

S₂ = Numero de variables en la capa de salida.

Tabla 78:

Numero de neuronas en las capas ocultas para cada una de las redes neuronales.

RNA	Numero de variables capas de entrada (S_1)	Numero de variables capas de salida (S_2)	Numero minimo de neuronas por capas ocultas (NNCOmin)	Numero maximo de neuronas por capas ocultas (NNCOmax)
RNA_S_A	12	1	3	25
RNA_S_B	9	1	3	19
RNA_S_C	6	1	2	13

Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo

En la tabla 78, se puede observar el rango mínimo y máximo de neuronas en las capas ocultas para cada uno de los modelos de RNA para predicción de la trabajabilidad del concreto SLUMP.

3.10.2.3 Entrenamiento de las RNA para la trabajabilidad del concreto.

Para el entrenamiento de los tres modelos de RNA se utilizó la arquitectura descrita anteriormente juntamente con una función de entrenamiento Bayesian regularization backpropagation (TRAINBR) con la definición de los parámetros a utilizar para el entrenamiento para cada una de las RNA mostradas a continuación:

Tabla 79:

Características principales para el entrenamiento de RNA para predicción de trabajabilidad del concreto.

Entrenamiento de Redes Neuronales Artificiales RNA			
Red Neuronal Artificial	RNA_S_A	RNA_S_B	RNA_S_C
Arquitectura	Perceptrón Multicapa	Perceptrón Multicapa	Perceptrón Multicapa
Tipo de conexión	Feed-forward (Hacia adelante)	Feed-forward (Hacia adelante)	Feed-forward (Hacia adelante)
Capas ocultas	1	1	1
Variables de entrada	12	9	6

Neuronas en la capa oculta	Desde 3 hasta 25 neuronas	Desde 3 hasta 19 neuronas	Desde 2 hasta 13 neuronas
VARIABLES DE SALIDA	1	1	1
FUNCIÓN DE ACTIVACIÓN	Tangente sigmooidal	Tangente sigmooidal	Tangente sigmooidal
ALGORITMO DE APRENDIZAJE	Supervisado	Supervisado	Supervisado
TIPO DE APRENDIZAJE	Aprendizaje por corrección de error	Aprendizaje por corrección de error	Aprendizaje por corrección de error
FUNCIÓN DE ENTRENAMIENTO	TRAINBR (Bayesian regularization backpropagation)	TRAINBR (Bayesian regularization backpropagation)	TRAINBR (Bayesian regularization backpropagation)
SALIDA	Trabajabilidad del concreto (Slump)	Trabajabilidad del concreto (Slump)	Trabajabilidad del concreto (Slump)

Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo

En la tabla 79, se puede observar las características principales para los tres modelos de RNA con una variación solamente en las variables de entrada.

Una vez definido los parámetros de entrenamiento se procedió con la elaboración de los modelos para lo cual se utilizó los 27 registros almacenados en el ANEXO 03, estos fueron divididos en entrenamiento 70%, para validación 15% y para el test 15% de manera aleatoria.

3.10.2.4 Elaboración de modelos de RNA en Matlab.

Para la elaboración de los tres modelos de RNA se utilizó el lenguaje de programación Matlab con su caja de herramientas (Neural Network Toolbox). Para lo cual se desarrolló un código principal que llama a diferentes funciones como son funciones de cargar datos, función para crear una red neuronal con una capa oculta, función para extraer los pesos de la red neuronal, estos son organizados como se muestra a continuación:

- Función Cargar datos.



- Función para cargar datos 12 variables de entrada.
- Función para cargar datos 9 variables de entrada.
- Función para cargar datos 6 variables de entrada.
- Función para crear RNA con una capa oculta.
- Función para extraer los pesos de la capa oculta y bias.
- Código principal para la elaboración de las RNA en la predicción de la trabajabilidad del concreto.
- Código para prueba de la RNA para predecir la trabajabilidad del concreto.

Seguidamente se presenta el código utilizado para cada una de las funciones definidas y el código principal.

3.10.2.4.1 Función para cargar datos de acuerdo al número de variables de entrada

3.10.2.4.1.1 Función para cargar datos (*Cargar_Datos_12V.m*)

Esta función está en cargada de transferir los datos almacenados en hoja de cálculo hacia el entorno de Matlab en forma de matriz. Creando dos matrices denominadas entrada y salida, la matriz entrada recibe las 12 variables cada una con sus registros. Mientras que la matriz salida recibe una variable con sus registros. A continuación, se presenta la codificación de la función en la cual se describe su proceso.

Código 9:

Función para cargar datos 12 variables de entrada.

Función (*Cargar_Datos_12V.m*)

```
%% = Función para cargar 12 variables de entrada =  
%Función para cargar datos de la hoja de cálculo en formato Excel (.xlsx)  
%Retorna los valores en Matrices de entrada y Salida  
function [Entrada_Datos, Salida_Datos]= Cargar_datos_12v(Nombre_archivo)  
warning ('off')  
%Identifica el nombre del archivo y las descripciones en texto de cada columna en formato  
xlsx  
Training_Dataset = Nombre_archivo;  
Training_Dataset_Options = detectImportOptions(Training_Dataset);  
Training_Data = readtable(Training_Dataset,Training_Dataset_Options,'UseExcel', false)
```



```
%Se asignan los atributos de cada columna y se guardan los datos en vectores asignados para
formar la matriz de data para la realización de la RNA con 12 variables de entrada
DisenoACI_Dato = Training_Data.DisenoACI;
DisenoMF_Dato = Training_Data.DisenoMF;
DisenoW_Dato = Training_Data.DisenoW;
Cemento_Dato = Training_Data.Cemento;
AgFino_Dato = Training_Data.AgFino;
AgGrueso_Dato = Training_Data.AgGrueso;
Agua_Dato = Training_Data.Agua;
MEPS_Dato = Training_Data.MEPS;
VolMEPS_Dato = Training_Data.VolMEPS;
TempMEPS_Dato = Training_Data.TempMEPS;
PeMEPS_Dato = Training_Data.PeMEPS;
DiametroMEPS_Dato = Training_Data.DiametroMEPS;

%Se crea la matriz con todos los vectores de entrada para la Red Neuronal extraídos por
columna y se guarda en la matriz Entrada.
Entrada_Datos = [DisenoACI_Dato, DisenoMF_Dato, DisenoW_Dato, Cemento_Dato,
AgFino_Dato, AgGrueso_Dato, Agua_Dato, MEPS_Dato, VolMEPS_Dato,
TempMEPS_Dato, PeMEPS_Dato,DiametroMEPS_Dato]

%Se crea la matriz con el vector extraídos en la columna de los valores de salida y se guarda
en la matriz salida.
Salida_Datos = Training_Data.Slump;

end
```

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

3.10.2.4.1.2 Función para cargar datos (Cargar_Datos_9V.m)

Esta función está en cargada de transferir los datos almacenados en hoja de cálculo hacia el entorno de Matlab en forma de matriz. Creando dos matrices denominadas entrada y salida, la matriz entrada recibe las 9 variables cada una con sus registros. Mientras que la matriz salida recibe una variable con sus registros. A continuación, se presenta la codificación de la función en la cual se describe su proceso.

Código 10:

Función para cargar datos 9 variables de entrada.

Función (Cargar_Datos_9V.m)

```
%% = Función para cargar 9 variables de entrada =
%Función para cargar datos de la hoja de cálculo en formato Excel (.xlsx)
%Retorna los valores en Matrices de entrada y Salida
function [Entrada_Datos, Salida_Datos]= Cargar_datos_9v(Nombre_archivo)
```



```
warning ('off')
%Identifica el nombre del archivo y las descripciones en texto de cada columna en formato
xlsx
Training_Dataset = Nombre_archivo;
Training_Dataset_Options = detectImportOptions(Training_Dataset);
Training_Data = readtable(Training_Dataset,Training_Dataset_Options,'UseExcel', false)

%Se asignan los atributos de cada columna y se guardan los datos en vectores asignados para
formar la matriz de data para la realización de la RNA con 9 variables de entrada
Cemento_Dato = Training_Data.Cemento;
AgFino_Dato = Training_Data.AgFino;
AgGrueso_Dato = Training_Data.AgGrueso;
Agua_Dato = Training_Data.Agua;
MEPS_Dato = Training_Data.MEPS;
VolMEPS_Dato = Training_Data.VolMEPS;
TempMEPS_Dato = Training_Data.TempMEPS;
PeMEPS_Dato = Training_Data.PeMEPS;
DiametroMEPS_Dato = Training_Data.DiametroMEPS;

%Se crea la matriz con todos los vectores de entrada para la Red Neuronal extraídos por
columna y se guarda en la matriz Entrada.
Entrada_Datos = [Cemento_Dato, AgFino_Dato, AgGrueso_Dato, Agua_Dato, MEPS_Dato,
VolMEPS_Dato, TempMEPS_Dato, PeMEPS_Dato,DiametroMEPS_Dato]

%Se crea la matriz con el vector extraídos en la columna de los valores de salida y se guarda
en la matriz salida.
Salida_Datos = Training_Data.Slump;

end
```

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

3.10.2.4.1.3 Función para cargar datos (Cargar_Datos_6V.m)

Esta función está en cargada de transferir los datos almacenados en hoja de cálculo hacia el entorno de Matlab en forma de matriz. Creando dos matrices denominadas entrada y salida, la matriz entrada recibe las 6 variables cada una con sus registros. Mientras que la matriz salida recibe una variable con sus registros. A continuación, se presenta la codificación de la función en la cual se describe su proceso.

Código 11:

Función para cargar 6 variables de entrada.

```
Función (Cargar_Datos_6V.m)
%% = Función para cargar 6 variables de entrada =
%Función para cargar datos de la hoja de cálculo en formato Excel (.xlsx)
%Retorna los valores en Matrices de entrada y Salida
function [Entrada_Datos, Salida_Datos]= Cargar_datos_6v(Nombre_archivo)
```

```
warning ('off')
%Identifica el nombre del archivo y las descripciones en texto de cada columna en formato
xlsx
Training_Dataset = Nombre_archivo;
Training_Dataset_Options = detectImportOptions(Training_Dataset);
Training_Data = readtable(Training_Dataset, Training_Dataset_Options, 'UseExcel', false)

%Se asignan los atributos de cada columna y se guardan los datos en vectores asignados para
formar la matriz de data para la realización de la RNA con 6 variables de entrada
Cemento_Dato = Training_Data.Cemento;
AgFino_Dato = Training_Data.AgFino;
AgGrueso_Dato = Training_Data.AgGrueso;
Agua_Dato = Training_Data.Agua;
MEPS_Dato = Training_Data.MEPS;
TempMEPS_Dato = Training_Data.TempMEPS;
%Se crea la matriz con todos los vectores de entrada para la Red Neuronal extraídos por
columna y se guarda en la matriz Entrada.
Entrada_Datos = [Cemento_Dato, AgFino_Dato, AgGrueso_Dato, Agua_Dato,
TempMEPS_Dato]

%Se crea la matriz con el vector extraídos en la columna de los valores de salida y se guarda
en la matriz salida.
Salida_Datos = Training_Data.Slump;

end
```

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

3.10.2.4.2 Función para crear RNA con una capa oculta

Esta función se encarga de la elaboración de una RNA con una capa oculta para lo cual recibe los valores de las matrices de entrada, salida y el número de neuronas para la capa oculta. Una vez recibe los parámetros se comienza la creación de la RNA definiendo una arquitectura perceptrón multicapa con una conexión hacia adelante Feedforward con una función de transferencia tangente sigmoïdal. Para el entrenamiento utiliza la función TRAINBR (Bayesian regularization backpropagation) con sus respectivos parámetros. Una vez definido la configuración de la red neuronal se procede a entrenar, validar y realizar el test de la RNA. Para la validación se definió el uso del error cuadrático medio (MSE) el cual se obtiene de la diferencia entre el valor real y el valor predicho elevado al cuadrado. A continuación, se presenta la codificación de la función en la cual se describe su proceso.



Código 12:

Función RNA Slump con una capa oculta.

Función (RNA_Slump_con_una_CapaOculta.m)

%% == Función Entrenando la red RNA_Slump_con_una_CapaOculta ==

```
function [Prediccion, tr, valRatio] = RNA_Slump_con_una_CapaOculta(Entrada_Datos,
Salida_Datos, Neuronas_capaoculta)
%entrenar la Red Neuronal como: trainlm, trainbr, trainscg
Algoritmo_De_Aprendizaje = 'trainbr';
%Asignacion de las dos capas ocultas a la RNA
Arquitectura_Red = [Neuronas_capaoculta];

%inicializando creando la red neuronal con retro propagación hacia atrás
RNA_Slump_con_una_CapaOculta= feedforwardnet(Arquitectura_Red,
Algoritmo_De_Aprendizaje);

%Parámetro para la red neuronal
RNA_Slump_con_una_CapaOculta.trainParam.epochs = (1000); %Numero de épocas
máximas
RNA_Slump_con_una_CapaOculta.trainParam.max_fail = 200; %Máximo de errores de
validación
RNA_Slump_con_una_CapaOculta.trainParam.min_grad = 1e-7; %Gradiente mínimo de
rendimiento
RNA_Slump_con_una_CapaOculta.trainParam.mu=0.001; %Factor de aprendizaje para
modificar los pesos iniciales
RNA_Slump_con_una_CapaOculta.trainParam.mu_dec=0.1; %Factor de aprendizaje
decreciente
RNA_Slump_con_una_CapaOculta.trainParam.mu_inc=10; %Factor de aprendizaje creciente
RNA_Slump_con_una_CapaOculta.trainParam.showWindow=true;

%Selección de la performance de la Red neuronal utilizando el error cuadrático medio (MSE)
RNA_Slump_con_una_CapaOculta.performFcn='mse';

%Función de activación tangente sigmoidal para la capa oculta
RNA_Slump_con_una_CapaOculta.layers{1}.transferFcn = 'tansig';

%Configuración de la red neuronal
configure (RNA_Slump_con_una_CapaOculta,Entrada_Datos,Salida_Datos)
%división de nuestros datos de entrenamiento en entrena miento 70%,validacion 15% y el test
15%
RNA_Slump_con_una_CapaOculta.divideFcn = 'dividerand';
RNA_Slump_con_una_CapaOculta.divideMode = 'sample';
RNA_Slump_con_una_CapaOculta.divideParam.trainRatio = 70/100;
RNA_Slump_con_una_CapaOculta.divideParam.testRatio = 15/100;
RNA_Slump_con_una_CapaOculta.divideParam.valRatio = 15/100;

%Reporte en gráficos del performance, estado de entrenamiento, test y validación de la Red
neuronal artificial
RNA_Slump_con_una_CapaOculta.plotFcns = {'plotperform', 'plottrainstate', 'ploterrhist',
'plotregression'};
```

```
% Valores de predicción de la Red Neuronal Artificial almacenados en la matriz Predicción.  
[Prediccion, tr] = train(RNA_Slump_con_una_CapaOculto, Entrada_Datos', Salida_Datos');  
end
```

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

3.10.2.4.3 Función para extraer los pesos de la capa oculta y bias.

La función se encarga de la extracción de los valores de los pesos de la capa oculta y el bias, para lo cual primeramente recibe el nombre de la RNA a la que se le va extraer los pesos y estos serán almacenados en las variables w1, w2, b1 y b2. A continuación, se presenta la codificación de la función en la cual se describe su proceso.

Código 13:

Función extrae pesos capa oculta.

Función (Extrae_Pesos_capa_oculta.m)

```
function [w1,w2,b1,b2] = Extrae_Pesos_CapaOculto(red)  
%extraccion de los pesos de la capa oculta LW y almacenada w1  
w1=red.IW{1,1}  
%extraccion de los pesos de la capa oculta LW y almacenada w1  
w2=red.LW{2,1}  
%extraccion de los pesos del bias b{1} y almacenada b1  
b1=red.b{1}  
%extraccion de los pesos del bias b{2} y almacenada b2  
b2=red.b{2}  
end
```

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

3.10.2.4.4 Código principal para la elaboración de las RNA en la predicción de la trabajabilidad del concreto.

El código principal es el encargado de crear las diferentes RNA para lo cual primero se selecciona el número de variables de entrada que son 12, 9 y 6 una vez seleccionada se cargan los datos para la elaboración y prueba de la RNA, luego se define el número de capas en la capa oculta de acuerdo a si valor máximo y mínimo. Seguidamente se utilizará la función para la creación de la RNA, una vez creada procede la extracción de los pesos de la capa oculta, para posteriormente con los datos de prueba



probar la efectividad de la RNA. A continuación, se presenta el código principal el cual se describe el proceso paso a paso.

Código 14:

Código principal para creación de las redes neurales para la predicción de la trabajabilidad del concreto.

Código Principal para creación de las Redes Neuronales para la predicción de la trabajabilidad del concreto (RNA_Principal.m)

```
clear; clc;
fprintf('\nOpciones de variables de entrada\n');
fprintf('\nPresione 1 para 12 variables de entrada\n');
fprintf('\nPresione 2 para 9 variables de entrada\n');
fprintf('\nPresione 3 para 6 variables de entrada\n');

Numero_Entradas=input('\nSeleccione el número de variables de entrada de acuerdo a las
opciones ..... \n');
switch Numero_Entradas
    case 1
        fprintf('\nSe utilizara el modelo de RNA_S_A con 12 variables de entrada\n');

        fprintf('\nCargar los datos para la elaboración de la RNA\n');
        %Se cargan los datos de la matriz 24x12 usando función Cargar_Datos_12V.m los cuales
        nos servirán para la elaboración de la RNA asignando los valores en las Entradas y en
        salidas
        [V_Entrada, V_Salida]= Cargar_Datos_12V('Crear_RNA.xlsx');

        %Ingrese mediante el teclado el número de neuronas en la capa oculta
        fprintf('\nIngrese el número de neuronas en la capa oculta\n');
        fprintf('\nComo mínimo 3 neuronas y como máximo 25 neuronas\n');

        Neuronas_capa_oculta=input('\nIngrese Numero de neuronas de la capa oculta ..... \n');
        minVal = 3;
        maxVal = 25;

        if (Neuronas_capa_oculta >= minVal) & (Neuronas_capa_oculta <= maxVal)
            disp('El número de neuronas en la capa oculta se encuentran dentro del rango
            especificado.')

            fprintf('\nCreación de la Red Neuronal Artificial con una capa oculta ..... \n')
            %Se crea la RNA con la matriz de entrada, salida y numero de neuronas en la capa
            oculta utilizando la función RNA_Slump_con_una_CapaOculta
            [RNA_S_A, tr] = RNA_Slump_con_una_CapaOculta(V_Entrada, V_Salida,
            Neuronas_capa_oculta)

        fprintf('\nExtracción de los pesos de la capa oculta y el bias Red neuronal artificial Red_
        Neuronal_1 ..... \n')
        %Se extrae los pesos de las capas ocultas y de los bias
```



```
[w1,w2,b1,b2] = Extrae_Pesos_CapaOculto(RNA_S_A)

fprintf('\nGuardado de la RNA ..... \n')
%Se guarda la red neuronal
save RNA_S_A

elseif (Neuronas_capa_oculta > maxVal)
    disp('El número de neuronas en la capa oculta supera el valor máximo.')
else
    disp('El número de neuronas en la capa oculta supera el valor mínimo.')
end

case 2
fprintf('\nSe utilizara el modelo de RNA_S_B con 9 variables de entrada\n');

fprintf('\nPresione enter para cargar los datos para la elaboración de la RNA\n');
%Se cargan los datos de la matriz 24x9 usando función Cargar_Datos_9V.m los cuales
nos servirán para la elaboración de la RNA asignando los valores en las Entradas y en
salidas
[V_Entrada, V_Salida]= Cargar_Datos_9V('Crear_RNA.xlsx');

%Ingrese mediante el teclado el número de neuronas en la capa oculta
fprintf('\nIngrese el número de neuronas en la capa oculta\n');
fprintf('\nComo mínimo 3 neuronas y como máximo 19 neuronas\n');
Neuronas_capa_oculta=input('\nIngrese Numero de neuronas de la capa oculta ..... \n');
minVal = 3;
maxVal = 19;

if (Neuronas_capa_oculta >= minVal) & (Neuronas_capa_oculta <= maxVal)
    fprintf('\nCreacion de la Red Neuronal Artificial con una capa oculta ..... \n')
    %Se crea la RNA con la matriz de entrada, salida y numero de neuronas en la capa
    oculta utilizando la función RNA_Slump_con_una_CapaOculto
    [RNA_S_B, tr] = RNA_Slump_con_una_CapaOculto(V_Entrada, V_Salida,
    Neuronas_capa_oculta)

    fprintf('\nExtracción de los pesos de la capa oculta y el bias Red neuronal artificial
    Red_Neuronal_1 ..... \n')
    %Se extrae los pesos de las capas ocultas y de los bias
    [w1,w2,b1,b2] = Extrae_Pesos_CapaOculto(RNA_S_B)

    fprintf('\nGuardado de la RNA ..... \n')
    %Se guarda la red neuronal
    save RNA_S_B
elseif (Neuronas_capa_oculta > maxVal)
    disp('El número de neuronas en la capa oculta supera el valor máximo.')
else
    disp('El número de neuronas en la capa oculta supera el valor minimo.')
end

case 3
fprintf('\nSe utilizara el modelo de RNA_S_C con 6 variables de entrada\n');

fprintf('\nPresione enter para cargar los datos para la elaboración de la RNA\n');
```



```
%Se cargan los datos de la matriz 24x6 usando función Cargar_Datos_6V.m los cuales
nos servirán para la elaboración de la RNA asignando los valores en las Entradas y en
salidas
[V_Entrada, V_Salida]= Cargar_Datos_6V('Crear_RNA.xlsx');

%Ingrese mediante el teclado el número de neuronas en la capa oculta
fprintf('\nIngrese el número de neuronas en la capa oculta\n');
fprintf('\nComo mínimo 2 neuronas y como máximo 13 neuronas\n');

Neuronas_capa_oculta=input('\nIngrese Numero de neuronas de la capa oculta ..... \n');
minVal = 2;
maxVal = 13;

if (Neuronas_capa_oculta >= minVal) & (Neuronas_capa_oculta <= maxVal)
    fprintf('\nCreación de la Red Neuronal Artificial con una capa oculta ..... \n')
    %Se crea la RNA con la matriz de entrada, salida y numero de neuronas en la capa
    oculta utilizando la función RNA_Slump_con_una_CapaOculta
    [RNA_S_C, tr] = RNA_Slump_con_una_CapaOculta(V_Entrada, V_Salida,
    Neuronas_capa_oculta)

    fprintf('\nExtracción de los pesos de la capa oculta y el bias Red neuronal artificial
    Red_Neuronal_1 ..... \n')
    %Se extrae los pesos de las capas ocultas y de los bias
    [w1,w2,b1,b2] = Extrae_Pesos_CapaOculta(RNA_S_C)

    fprintf('\nGuardado de la RNA ..... \n')
    %Se guarda la red neuronal
    save RNA_S_C
elseif (Neuronas_capa_oculta > maxVal)
    disp('El número de neuronas en la capa oculta supera el valor máximo.')
else
    disp('El número de neuronas en la capa oculta supera el valor mínimo.')
end
end
```

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

3.10.2.4.5 Código para prueba de la RNA para predecir la trabajabilidad del concreto.

El código de prueba es el encargado de realizar predicciones utilizando los modelos de RNA elaborados para lo cual primeramente se deberá de adjuntar un archivo en XLSX con las variables de entrada que se deseen predecir.

Código 15:

Código para probar los modelos RNA_FC.



Código para probar los modelos RNA_Slump (Prueba_RNA_Slump.m)

```
fprintf('\nQue tipo de modelo de RNA se elaboro\n');
fprintf('\nPresione 1 para modelo RNA_S_A de 12 Variables\n');
fprintf('\nPresione 2 para modelo RNA_S_B de 9 Variables\n');
fprintf('\nPresione 3 para modelo RNA_S_C de 6 Variables\n');
Numero_Entradas=input('\nSeleccione el modelo de acuerdo a las opciones ..... \n');
switch Numero_Entradas
case 1
    fprintf('\nCargar los datos para la prueba\n');
    %Se cargan los datos de la matriz 6x12 usando la función Cargar_Datos_12V.m los cuales nos servirán para realizar la prueba de la RNA asignando los valores en las Entradas y en salidas
    [PruebaEntrada, PruebaSalida]= Cargar_Datos_12V('Prueba_RNA.xlsx')
    fprintf('\nPredicción de prueba de trabajabilidad del concreto con la RNA ..... \n')
    %Se guarda las predicciones de la RNA
    PruebaSalida_Prediccion = RNA_S_A(PruebaEntrada)
case 2
    fprintf('\nPresione enter para cargar los datos para la prueba\n');
    %Se cargan los datos de la matriz 6x9 usando la función Cargar_Datos_9V.m los cuales nos servirán para realizar la prueba de la RNA asignando los valores en las Entradas y en salidas
    [PruebaEntrada, PruebaSalida]= Cargar_Datos_9V('Prueba_RNA.xlsx');
    fprintf('\nPredicción de prueba de trabajabilidad del concreto con la RNA ..... \n')
    %Se guarda las predicciones de la RNA
    PruebaSalida_Prediccion = RNA_S_B(PruebaEntrada)
case 3
    fprintf('\nPresione enter para cargar los datos para la prueba\n');
    %Se cargan los datos de la matriz 6x6 usando la función Cargar_Datos_6V.m los cuales nos servirán para realizar la prueba de la RNA asignando los valores en las Entradas y en salidas
    [PruebaEntrada, PruebaSalida]= Cargar_Datos_6V('Prueba_RNA.xlsx');
    fprintf('\nPredicción de prueba de trabajabilidad del concreto con la RNA ..... \n')
    %Se guarda las predicciones de la RNA
    PruebaSalida_Prediccion = RNA_S_C(PruebaEntrada)
end
```

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

3.10.2.5 Validación y evaluación de modelos.

Para la validación y evaluación de los cuatro modelos de RNA se utiliza el error cuadrático medio MSE en todas las fases de elaboración de la RNA, seleccionando los modelos con número de neuronas en la capa oculta que tengan el menor error cuadrático MSE.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 RESULTADOS DE PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS AGREGADOS.

4.1.1 Resultados de contenido de humedad.

Tabla 80:

Resultados de contenido de humedad agregado fino.

Resultados Contenido de Humedad Agregado Fino		
N° De Prueba	Prueba 1	Prueba 2
Contenido de humedad W%	0.93	0.96
Promedio cont. Humedad W%	0.95	

Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo.

Tabla 81:

Resultados de contenido de humedad agregado grueso.

Resultados Contenido de Humedad Agregado Grueso		
N° De Prueba	Prueba 1	Prueba 2
Contenido de humedad W%	0.86	0.80
Promedio cont. Humedad W%	0.83	

Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo.

Interpretación: En las tablas 80 y 81 se pueden ver los resultados del contenido de humedad obtenidos para el material fino de 0.95 y para el material grueso de 0.83 los cuales nos indica un bajo valor de humedad encontrados en condiciones secas, los cuales nos servirán para la obtención de la corrección por humedad de los agregados.

4.1.2 Resultados de análisis granulométrico

4.1.2.1 Análisis granulométrico agregado fino

Tabla 82:

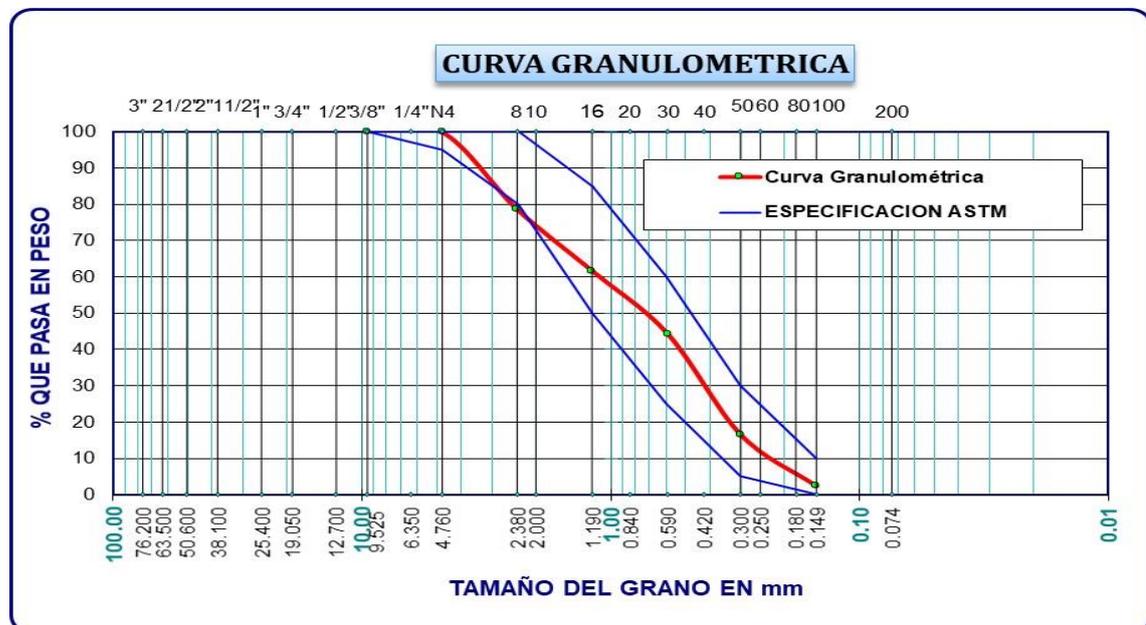
Ensayo de granulometría del agregado fino, Cantera Cutimbo.

Análisis Granulométrico del Agregado Fino						
Tamices ASTM	Abertura mm	Peso Retenido	% Retenido parcial	% Retenido acumulado	% Que pasa	Especificaciones ASTM
3/8"	9.525					100
No4	4.760	1.10	0.21	0.21	99.79	95
No8	2.380	108.80	21.21	21.42	78.58	80
No16	1.190	86.70	16.90	38.32	61.68	50
No30	0.590	89.50	17.45	55.77	44.23	25
No50	0.300	142.50	27.78	83.55	16.45	5
No100	0.149	72.40	14.11	97.66	2.34	0
No200	0.074	11.10	2.16	99.82	0.18	10
Base		0.90	0.18	100.00	0.00	
Total		513.00	100.00			
% Perdida		0.16				

Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo.

Figura 64:

Curva granulométrica del agregado fino.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: Se puede observar en la figura 64 y tabla 82 que el porcentaje que pasa por los tamices se encuentra comprendido dentro de los rangos mínimos y

máximos establecidos según la normativa NTP 400.037. Es por ello que se consideró el material fino recomendado para el uso en el presente proyecto.

4.1.2.2 Análisis granulométrico agregado grueso

Tabla 83:

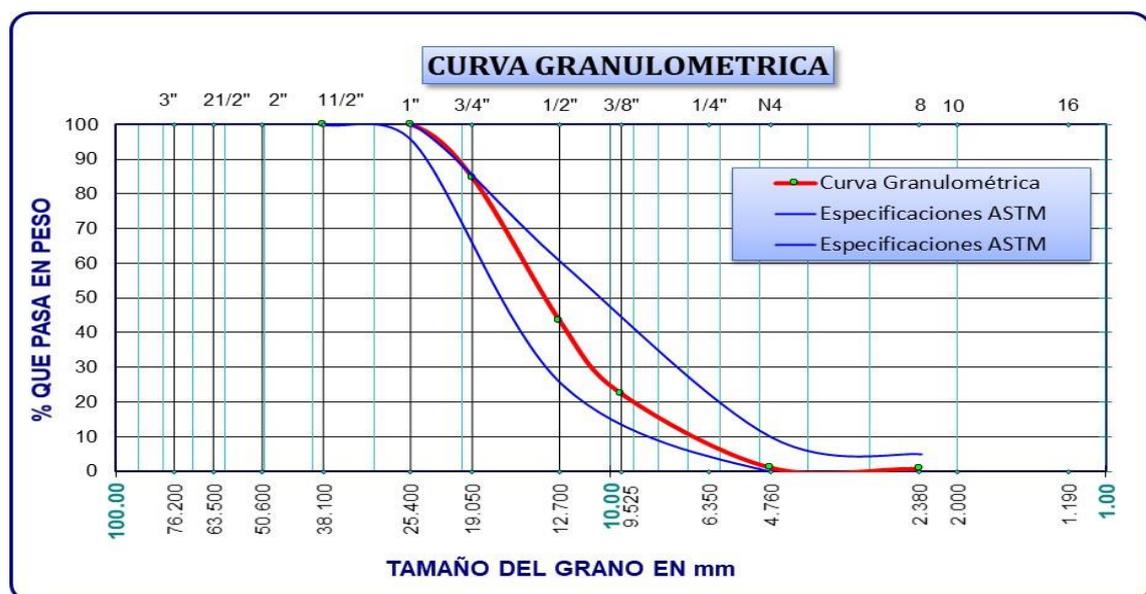
Ensayo de granulometría del agregado grueso, piedra chancada de cantera de producción de agregados de Cabanillas.

Análisis Granulométrico del Agregado Grueso Huso # 57							
Tamices ASTM	Abertura mm	Peso Retenido	% Retenido parcial	% Retenido acumulado	% Que pasa	Especificaciones ASTM	
2"	50.600						
1 1/2"	38.100					100	100
1"	25.400					95	100
3/4"	19.050	809.30	15.30	15.30	84.70		
1/2"	12.700	2177.60	41.18	56.48	43.52	25	60
3/8"	9.525	1113.60	21.06	77.54	22.46		
No4	4.760	1124.00	21.25	98.79	1.21	0	10
No8	2.380	18.90	0.36	99.15	0.85	0	5
Base		45.00	0.85	100.00	0.00		
Total		5288.40	100.00				
% Perdida		0.26	100.00				

Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo.

Figura 65:

Curva granulométrica del agregado grueso.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: De acuerdo a la tabla 83 y la figura 65 nos muestra el análisis granulométrico del material grueso correspondiente a una piedra chancada, obtenida de la cantera de producción de agregados FIMECON SAC. Del análisis granulométrico se puede interpretar que el material se encuentra dentro de los rangos mínimos y máximos para un uso #57 los cuales son establecidos respecto a la normativa NTP 400.37, lo cual nos asegura que el material mencionado cumple los criterios aceptables para la fabricación de concreto, garantizando una buena trabajabilidad.

Figura 66:

Clasificación requerida para Agregado Grueso.

Requisitos de calificación para gruesos Agregados															
Tamaño Número	Tamaño Nominal (Tamices con Abertura Cuadrada)	Cantidades mas finas que cada tamiz de laboratorio (aberturas cuadradas), % en peso													
		100 mm (4")	90 mm (3 1/2")	75 mm (3")	63 mm (2 1/2")	50 mm (2")	37.5 mm (1 1/2")	25.0 mm (1")	19.0 mm (3/4")	12.5 mm (1/2")	9.5 mm (3/8")	4.75 mm (N° 4)	2.36 mm (N° 8)	1.18 mm (N° 16)	300 µm (N° 50)
1	90 a 37.5 mm (3 1/2" a 1 1/2")	100	90 a 100		25 a 60		0 a 15		0 a 15						
2	63 a 37.5 mm (2 1/2" a 1 1/2")			100	90 a 100	35 a 70	0 a 15		0 a 15						
3	50 a 25.0 mm (2" a 1")				100	90 a 100	35 a 70	0 a 15		0 a 15					
357	50 a 4.75 mm (2" a N° 4)				100	95 a 100		35 a 70		10 a 30		0 a 15			
4	37.5 a 19.0 mm (1 1/2" a 3/4")					100	90 a 100	20 a 55	0 a 15		0 a 15				
467	37.5 a 4.75 mm (1 1/2" a N° 4)					100	95 a 100		35 a 70		10 a 30	0 a 15			
5	25.0 a 12.5 mm (1" a 1/2")						100	90 a 100	20 a 55	0 a 10	0 a 15				
56	25.0 a 9.5 mm (1" a 3/8")						100	90 a 100	40 a 85	10 a 40	0 a 15	0 a 5			
57	25.0 a 4.75 mm (1" a N° 4)						100	95 a 100		25 a 60		0 a 10	0 a 5		
6	19.0 a 9.5 mm (3/4" a 3/8")							100	95 a 100	20 a 55	0 a 15	0 a 5			
67	19.0 a 4.75 mm (3/4" a N° 4)							100	95 a 100		20 a 55	5 a 10	0 a 5		
7	12.5 a 4.75 mm (1/2" a N° 4)								100	95 a 100	40 a 70	0 a 15	0 a 5		
8	9.5 a 2.36 mm (3/8" a N° 8)									90 a 100	85 a 100	10 a 30	0 a 10	0 a 5	
89	9.5 a 1.18 mm (3/8" a N° 16)									100	90 a 100	20 a 55	5 a 30	0 a 10	0 a 5
9	4.75 a 1.18 mm (N° 4 to N° 16)										100	85 a 100	10 a 40	0 a 10	0 a 5

Fuente: Proporcionados por la ASTM C33, observan gradaciones de agregados grueso (Huso N°57).

4.1.3 Resultados de módulo de fineza

Tabla 84:

Módulo de fineza del Agregado Fino – Cantera Cutimbo.

Resultados de módulo de fineza agregado fino	
N° De Prueba	Prueba I
Módulo de fineza	2.97

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Tabla 85:

Módulo de fineza del Agregado Grueso – piedra chancada de Cabanillas.

Resultados de módulo de fineza agregado grueso	
N° De Prueba	Prueba I
Módulo de fineza	6.91

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: Respecto a las tablas 84 y 85 podemos observar el reporte de los resultados obtenidos para el modulo de finura de los materiales fino y grueso. Para el material fino se obtuvo un módulo de finura de 2.97, este corresponde a un material que asegura una buena trabajabilidad a su vez se encuentra dentro de los límites de los rangos mínimos y máximos de 2.3 - 3.1 respecto a la normativa ASTM C33. A su vez el modulo de finura del material grueso (piedra chancada) fue de 6.91, lo cual nos indica la no presencia partículas grandes provocando un buen mezclado y una reducida segregación del concreto.

4.1.4 Resultados de Peso específico y absorción del agregado fino

Tabla 86

Resultados de gravedad específica y absorción agregado fino.

Gravedad específica y absorción agregado fino		
N° de Prueba	Prueba I	Prueba II
Gravedad Relativa (Gravedad específica) (OD) (gr/cm ³)	2.45	2.46
Promedio de la Gravedad Relativa (Gravedad específica) (OD) (gr/cm ³)	2.46	
Gravedad Relativa (Gravedad específica) (SSD) (gr/cm ³)	2.52	2.52
Promedio de la Gravedad Relativa (Gravedad específica) (SSD) (gr/cm ³)	2.52	
Gravedad Relativa Aparente (Gravedad específica) (gr/cm ³)	2.63	2.63
Promedio de la Gravedad Relativa Aparente (Gravedad específica) (gr/cm ³)	2.63	
Porcentaje de Absorción (%)	2.74	2.65
Promedio del porcentaje de Absorción (%)	2.70	

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: Se puede observar en la tabla 86 los resultados de la gravedad relativa alcanzada para el material fino fueron de 2.52 g/cm³, este valor se encuentra establecido en los límites mínimos y máximo establecidos por la normativa ASTM C128, concluyéndose que dicho material fino se utilizara sin ningún inconveniente para obtener concretos normales.

Respecto a la absorción en la tabla 86 se muestra el resultado obtenido para el material fino fue de 2.70% lo cual que presenta una absorción buena y apta para la elaboración de concretos en la presente investigación.

La gravedad específica está relacionada con la porosidad, cuanto mayor sea su valor, más estable y menos porosa será. De acuerdo con los valores 2.56 y 2.53 para agregado fino o grueso, son aceptables para la preparación del concreto (Torre, 2004).

4.1.5 Resultados de Peso específico y absorción del agregado grueso

Tabla 87:

Resultados de gravedad específica y absorción agregado fino.

Gravedad específica y absorción agregado grueso		
N° de Prueba	Prueba I	Prueba II
Gravedad Relativa (Gravedad específica) (OD) (gr/cm ³)	2.49	2.50
Promedio de la Gravedad Relativa (Gravedad específica) (OD) (gr/cm ³)	2.50	
Gravedad Relativa (Gravedad específica) (SSD) (gr/cm ³)	2.54	2.55
Promedio de la Gravedad Relativa (Gravedad específica) (SSD) (gr/cm ³)	2.55	
Gravedad Relativa Aparente (Gravedad específica) (gr/cm ³)	2.63	2.64
Promedio de la Gravedad Relativa Aparente (Gravedad específica) (gr/cm ³)	2.63	
Porcentaje de Absorción (%)	2.0	2.1
Promedio del porcentaje de Absorción (%)	2.1	

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: Con respecto a la tabla 87 se interpreta los resultados obtenidos del ensayo de densidad y absorción para un material grueso obteniendo una gravedad específica relativa de 2.55 g/cm³, dicho valor se encuentra dentro de los rangos mínimos

establecidos según la ASTM C127, concluyéndose que el material grueso cumple con lo aceptable para la fabricación de concreto para el presente proyecto.

Con respecto a la absorción en la tabla 87 se observa el resultado del ensayo respectivo se obtuvo un valor de 2.10% de absorción los cual nos indica que el material se encuentra apto para la realización de concreto en la presente investigación.

La gravedad específica está relacionada con la porosidad, cuanto mayor sea su valor, más estable y menos porosa será. De acuerdo con los valores 2.56 y 2.53 para agregado fino o grueso, son aceptables para la preparación del concreto (Torre, 2004).

4.1.6 Resultados de peso unitario suelto seco (PUSS) y compactado (PUCS).

4.1.6.1 PUSS y PUCS del Agregado fino.

Tabla 88:

Resultado de peso unitario suelto agregado fino.

Peso unitario suelto agregado fino			
Identificador	Prueba I	Prueba II	Prueba III
Peso unitario (gr/cm^3)	1.57	1.57	1.57
Peso unitario Suelto (kg/m^3)		1571	
Peso unitario Suelto (g/cm^3)		1.571	

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Tabla 89:

Resultado de peso unitario compactado agregado fino.

Peso unitario compactado agregado fino			
Identificador	Prueba I	Prueba II	Prueba III
Peso unitario (gr/cm^3)	1.63	1.63	1.63
Peso unitario Suelto (kg/m^3)		1630	
Peso unitario Suelto (g/cm^3)		1.630	

Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la tabla 88 y 89, se observa los resultados del PUSS y PUCS del agregado fino obteniéndose un peso PUSS de 1.571 y un peso PUCS de 1.630 dichos

valores se encuentran en los rangos 1200 y 1760 kg/m³ recomendados para concretos por (Steven H. Kosmatka, 2008).

4.1.6.1 PUSS y PUCS del Agregado grueso.

Tabla 90:

Resultado de peso unitario suelto agregado grueso.

Recolección de datos de peso unitario suelto agregado grueso			
Identificador	Prueba I	Prueba II	Prueba III
Peso unitario (gr/cm ³)	1.41	1.39	1.40
Peso unitario Suelto (kg/m ³)		1402	
Peso unitario Suelto (g/cm ³)		1.402	

Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo.

Tabla 91:

Resultado de peso unitario compactado agregado grueso.

Recolección de datos de peso unitario compactado agregado grueso			
Identificador	Prueba I	Prueba II	Prueba III
Peso unitario (gr/cm ³)	1.54	1.55	1.56
Peso unitario Suelto (kg/m ³)		1550	
Peso unitario Suelto (g/cm ³)		1.550	

Fuente: Elaboración por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la tabla 90 y 91, se observa los resultados del PUSS y PUCS del agregado grueso obteniéndose un peso PUSS de 1.402 y un peso PUCS de 1.550 dichos valores se encuentran en los rangos 1200 y 1760 kg/m³ recomendados para concretos por (Steven H. Kosmatka, 2008).

4.2 RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES DE ESFERAS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO MODIFICADO (MEPS)

4.2.1 Resultados de análisis granulometría de las esferas de poliestireno expandido modificado (MEPS)

4.2.1.1 Resultados análisis granulometría MEPS sometidos a temperatura de 110°C

Tabla 92:

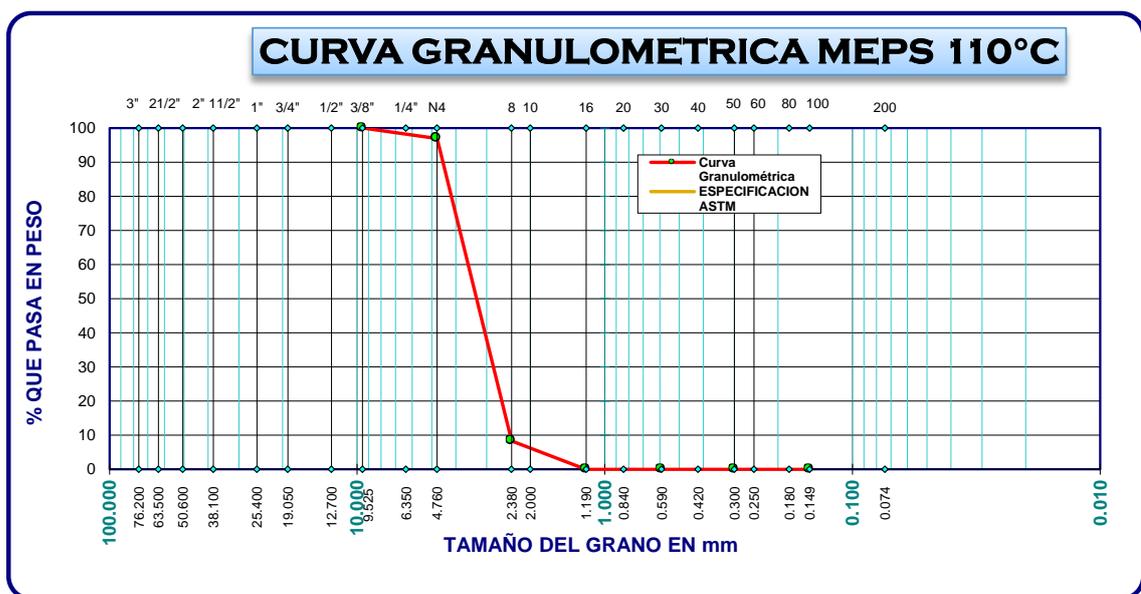
Ensayo de granulometría MEPS 110°C.

Análisis granulométrico MEPS Temperatura 110°C					
Tamices ASTM	Abertura mm	Peso Retenido	% Retenido parcial	% Retenido acumulado	% Que pasa
No4	4.760	1.51	3.02	3.02	96.98
No8	2.380	44.26	88.64	91.67	8.33
No16	1.190	4.16	8.33	100.00	0.00
Base		0.00	1.09	100.00	0.00
Total		49.93	100.00		
Perdida		0.07			

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 67:

Curva granulométrica MEPS 110°C.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: Según la tabla 92 y la figura 67, se observa los resultados del análisis granulométrico de los MEPS sometidas a una temperatura de 110°C, obteniendo una distribución de las partículas con un retenido parcial del 88.64% en el tamiz N°8.

4.2.1.2 Resultados análisis granulometría MEPS sometidos a temperatura de 130°C

Tabla 93:

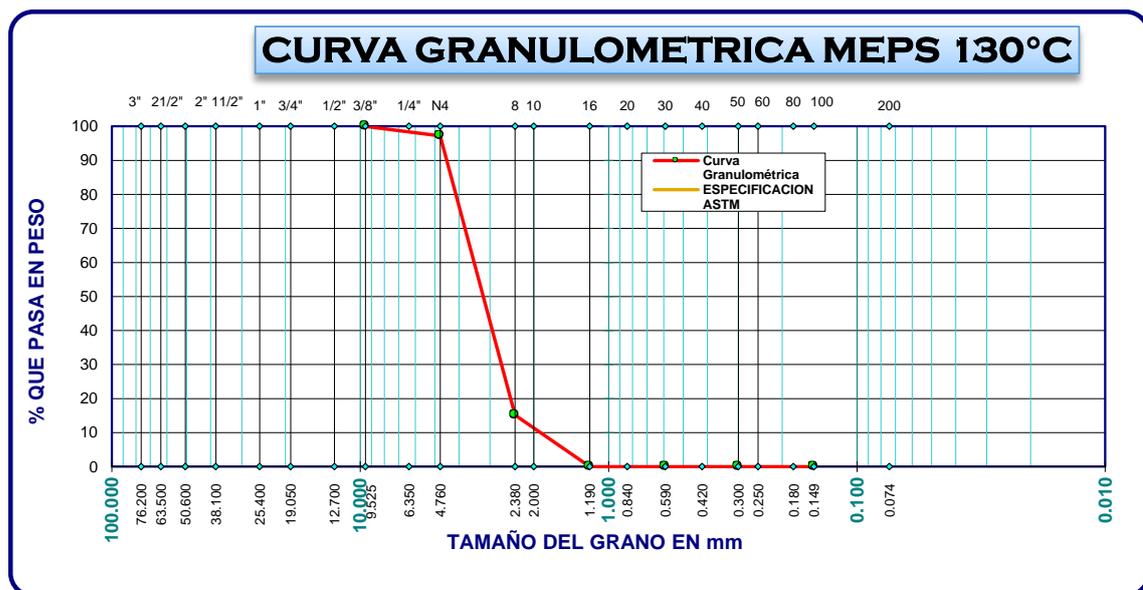
Ensayo de granulometría MEPS 130°C.

Análisis granulométrico MEPS Temperatura 130°C					
Tamices ASTM	Abertura mm	Peso Retenido	% Retenido parcial	% Retenido acumulado	% Que pasa
No4	4.760	1.39	2.78	2.78	97.22
No8	2.380	41.03	82.11	84.89	15.11
No16	1.190	7.55	15.11	100.00	0.00
Base		0.00	1.09	100.00	0.00
Total		49.97	100.00		
Perdida		0.03			

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 68:

Curva granulométrica MEPS 130°C.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: Según la tabla 93 y la figura 68, se observa los resultados del análisis granulométrico de los MEPS sometidas a una temperatura de 130°C, obteniendo una distribución de las partículas con un retenido parcial del 84.89% en el tamiz N°8.

4.2.1.3 Resultados análisis granulometría MEPS sometidos a temperatura de 145°C

Tabla 94:

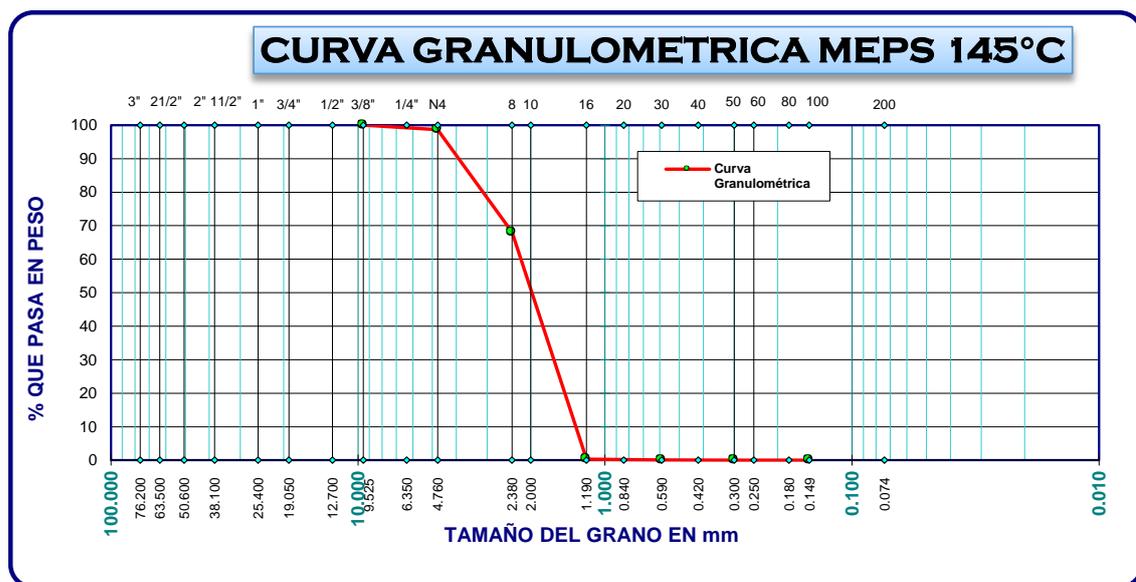
Ensayo de granulometría MEPS 145°C.

Análisis granulométrico MEPS Temperatura 145°C					
Tamices ASTM	Abertura mm	Peso Retenido	% Retenido parcial	% Retenido acumulado	% Que pasa
No4	4.760	1.32	1.32	1.32	98.68
No8	2.380	30.64	30.65	31.97	68.03
No16	1.190	67.66	67.69	99.66	0.34
No30	0.590	0.30	0.30	99.96	0.04
No50	0.300	0.04	0.04	100.00	0.00
Base		0.00	1.09	100.00	0.00
Total		99.96	100.00		
Perdida		0.04			

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Figura 69:

Curva granulométrica MEPS 145°C.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.



Interpretación: Según la tabla 94 y la figura 69, se observa los resultados del análisis granulométrico de los MEPS sometidas a una temperatura de 145°C, obteniendo una distribución de las partículas con un retenido parcial del 99.66% en el tamiz N°16.

4.2.2 Resultados de diámetro promedio de las esferas de poliestireno expandido modificado (MEPS)

Tabla 95:

Resultados del diámetro promedio de los MEPS.

Temperatura de MEPS (°C)	Diámetro promedio (mm)
110	3.50
130	3.39
145	2.06

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la tabla 95, se observa el resultado del diámetro promedio de los MEPS a temperatura de 110°C, 130°C y 145°C, resultantes del 50% del retenido acumulado en el ensayo de análisis granulométrico.

4.2.3 Resultados de densidad de las esferas de poliestireno expandido modificado

(MEPS)

4.2.3.1 Resultado de densidad de MEPS 110°C

Tabla 96:

Ensayo densidad MEPS 110°C.

Densidad MEPS Temperatura 110°C			
N° de Prueba	Prueba I	Prueba II	Prueba III
Empuje del sistema E_s (Newton)	0.83	0.83	0.83
Volumen del sistema V_s (cm ³)	85.00	85.00	85.00
Empuje del sistema con MEPS E_{s_MEP} (Newton)	0.52	0.49	0.53
Volumen del sistema con MEPS V_s (cm ³)	53.10	49.90	53.70
Volumen de MEPS (cm ³)	31.90	35.10	31.30
Densidad MEPS (gr/cm ³)	0.038	0.037	0.038
Densidad MEPS (Kg/m ³)	37.62	37.04	38.34
Densidad MEPS (Kg/m ³)		37.66	

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la tabla 96, se observa los resultados de la densidad promedio de las esferas de poliestireno expandido modificado MEPS a una temperatura de 110°C es de 37.66 kg/m³ para un promedio de 3 pruebas.

4.2.3.2 Resultado de densidad de MEPS 130°C

Tabla 97:

Ensayo densidad MEPS 130°C.

Densidad MEPS Temperatura 130°C			
N° de Prueba	Prueba I	Prueba II	Prueba III
Empuje del sistema E_s (Newton)	0.83	0.83	0.83
Volumen del sistema V_s (cm ³)	85.00	85.00	85.00
Empuje del sistema con MEPS E_{s_MEP} (Newton)	0.52	0.52	0.53
Volumen del sistema con MEPS V_s (cm ³)	53.20	53.30	54.20
Volumen de MEPS (cm ³)	31.80	31.70	30.80
Densidad MEPS (gr/cm ³)	0.129	0.145	0.136
Densidad MEPS (Kg/m ³)	128.95	145.11	136.36
Densidad MEPS (Kg/m ³)		136.81	

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la tabla 97, se observa los resultados de la densidad promedio de las esferas de poliestireno expandido modificado MEPS a una temperatura de 130°C es de 136.81 kg/m³ para un promedio de 3 pruebas.

4.2.3.3 Resultado de densidad de MEPS 145°C

Tabla 98:

Ensayo densidad MEPS 145°C.

Densidad MEPS Temperatura 145°C			
N° de Prueba	Prueba I	Prueba II	Prueba III
Empuje del sistema E_s (Newton)	0.83	0.83	0.83
Volumen del sistema V_s (cm ³)	85.00	85.00	85.00
Empuje del sistema con MEPS E_{s_MEP} (Newton)	0.52	0.52	0.52
Volumen del sistema con MEPS V_s (cm ³)	53.30	52.90	52.50
Volumen de MEPS (cm ³)	31.70	32.10	32.50
Densidad MEPS (gr/cm ³)	0.211	0.227	0.222
Densidad MEPS (Kg/m ³)	211.36	227.41	221.54
Densidad MEPS (Kg/m ³)		220.10	

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la tabla 98, se observa los resultados de la densidad promedio de las esferas de poliestireno expandido modificado MEPS a una temperatura de 145°C es de 220.10 kg/m³ para un promedio de 3 pruebas.

4.3 RESULTADO DE ENSAYOS REALIZADOS

4.3.1 Resultados ensayos de concreto fresco

La trabajabilidad del concreto SLUMP fueron registrados para los métodos de ACI-211, MF y WALKER; con sustitución por un metro cubico del volumen de concreto en porcentajes del 5%, 15% y 30% con esferas de poliestireno expandido modificado MEPS a temperaturas de 110°C, 130°C y 145°C.

4.3.1.1 Resultado de ensayo de concreto fresco trabajabilidad SLUMP por el método ACI-211 con sustitución por MEPS

Tabla 99:

Ensayo en estado fresco trabajabilidad el concreto SLUMP para el método de diseño ACI con sustitución por MEPS.

N°	Descripcion	Trabajabilidad SLUMP	
		(cm)	(Pulgadas)
1	ACI Concreto Normal	8.13	3.2
2	ACI MEPS T110 5%	9.65	3.8
3	ACI MEPS T110 15%	3.30	1.3
4	ACI MEPS T110 30%	2.54	1.0
5	ACI MEPS T130 5%	6.10	2.4
6	ACI MEPS T130 10%	5.59	2.2
7	ACI MEPS T130 15%	2.79	1.1
8	ACI MEPS T145 5%	8.89	3.5
9	ACI MEPS T145 10%	4.57	1.8
10	ACI MEPS T145 15%	3.30	1.3

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la tabla 99, se observa los resultados de los ensayos en estado fresco trabajabilidad del concreto SLUMP para el método de diseño de mezclas ACI-211.

Lo cual puede deducir un comportamiento al ir aumentando la sustitución en porcentajes de MEPS el SLUMP disminuye su trabajabilidad.

4.3.1.2 Resultado de ensayo de concreto fresco trabajabilidad SLUMP por el método módulo de fineza de la combinación de agregados con sustitución por MEPS.

Tabla 100:

Ensayo en estado fresco trabajabilidad el concreto SLUMP para el método de diseño

Modulo de Fineza con MEPS con sustitución por MEPS.

N°	Descripcion	Trabajabilidad SLUMP	
		(cm)	(Pulgadas)
1	MF Concreto Normal	9.91	3.9
2	MF MEPS T110 5%	6.86	2.7
3	MF MEPS T110 15%	4.57	1.8
4	MF MEPS T110 30%	3.30	1.3
5	MF MEPS T130 5%	8.13	3.2
6	MF MEPS T130 10%	7.62	3.0
7	MF MEPS T130 15%	3.81	1.5
8	MF MEPS T145 5%	8.13	3.2
9	MF MEPS T145 10%	3.30	1.3
10	MF MEPS T145 15%	2.54	1.0

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la tabla 100, se observa los resultados de los ensayos en estado fresco trabajabilidad del concreto SLUMP para el método de diseño de mezclas MF. Lo cual puede deducir un comportamiento al ir aumentando la sustitución en porcentajes de MEPS el SLUMP disminuye su trabajabilidad.

4.3.1.3 Resultado de ensayo de concreto fresco trabajabilidad SLUMP por el método

WALKER con sustitución por MEPS

Tabla 101:

Ensayo en estado fresco trabajabilidad el concreto SLUMP para el método de diseño walker con sustitución por MEPS.

N°	Descripcion	Trabajabilidad SLUMP	
		(cm)	(Pulgadas)
1	W Concreto Normal	9.14	3.6
2	W MEPS T110 5%	8.64	3.4
3	W MEPS T110 15%	5.08	2.0
4	W MEPS T110 30%	3.05	1.2
5	W MEPS T130 5%	5.84	2.3
6	W MEPS T130 10%	6.10	2.4
7	W MEPS T130 15%	2.29	0.9
8	W MEPS T145 5%	9.14	3.6
9	W MEPS T145 10%	5.59	2.2
10	W MEPS T145 15%	2.79	1.1

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la tabla 101, se observa los resultados de los ensayos en estado fresco trabajabilidad del concreto SLUMP para el método de diseño de mezclas WALKER. Lo cual puede deducir un comportamiento al ir aumentando la sustitución en porcentajes de MEPS el SLUP disminuye su trabajabilidad.

4.3.2 Resultados del concreto endurecido

4.3.2.1 Resultado de ensayo de resistencia a la compresión del concreto

4.3.2.1.1 Resultado de pruebas a compresión simple método ACI-211 con sustitución

por MEPS

Tabla 102:

Resistencia a la compresión de $f'c=210$ kg/cm², método de diseño ACI con MEPS,

a/c=0.56.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN METODO ACI-211 CON MEPS							
Descripción	Edad días	Área cm ²	Lectura del dial KN	Rotura (kg/cm ²)	Diseño (kg/cm ²)	Promedio $f'c$ (kg/cm ²)	% Promedio
ACI Concreto Normal - 1	7	81.948	187.79	233.67	210.00		
ACI Concreto Normal - 2	7	81.318	172.20	215.93	210.00	220.62	105
ACI Concreto Normal - 3	7	81.820	170.30	212.24	210.00		
ACI Concreto Normal - 4	14	81.777	196.65	245.21	210.00		
ACI Concreto Normal - 5	14	82.044	194.16	241.31	210.00	239.40	114
ACI Concreto Normal - 6	14	81.830	185.91	231.67	210.00		
ACI Concreto Normal - 7	28	82.205	235.62	292.27	210.00		
ACI Concreto Normal - 8	28	81.606	212.31	265.29	210.00	277.83	132
ACI Concreto Normal - 9	28	81.137	219.56	275.93	210.00		
ACI MEPS T110 5% - 1	7	81.659	141.40	176.57	210.00		
ACI MEPS T110 5% - 2	7	81.884	140.37	174.80	210.00	175.81	84
ACI MEPS T110 5% - 3	7	81.414	140.57	176.06	210.00		
ACI MEPS T110 5% - 4	14	79.907	178.41	227.67	210.00		
ACI MEPS T110 5% - 5	14	80.574	172.66	218.51	210.00	222.27	106
ACI MEPS T110 5% - 6	14	80.669	174.54	220.63	210.00		
ACI MEPS T110 5% - 7	28	80.627	209.07	264.41	210.00		
ACI MEPS T110 5% - 8	28	80.118	213.08	271.20	210.00	266.87	127
ACI MEPS T110 5% - 9	28	81.105	210.79	265.01	210.00		
ACI MEPS T110 15% - 1	7	82.130	120.05	149.05	210.00		
ACI MEPS T110 15% - 2	7	83.032	113.90	139.88	210.00	144.30	69
ACI MEPS T110 15% - 3	7	81.969	115.73	143.97	210.00		



ACI MEPS T110 15% - 4	14	80.161	153.78	195.62	210.00		
ACI MEPS T110 15% - 5	14	81.339	164.96	206.80	210.00	201.19	96
ACI MEPS T110 15% - 6	14	81.318	160.42	201.16	210.00		
ACI MEPS T110 15% - 7	28	82.076	175.00	217.42	210.00		
ACI MEPS T110 15% - 8	28	81.499	180.05	225.27	210.00	221.56	106
ACI MEPS T110 15% - 9	28	81.777	178.03	221.99	210.00		
ACI MEPS T110 30% - 1	7	81.457	96.47	120.76	210.00		
ACI MEPS T110 30% - 2	7	82.194	97.53	121.00	210.00	120.81	58
ACI MEPS T110 30% - 3	7	81.691	96.68	120.68	210.00		
ACI MEPS T110 30% - 4	14	80.659	113.83	143.91	210.00		
ACI MEPS T110 30% - 5	14	81.777	118.07	147.22	210.00	145.45	69
ACI MEPS T110 30% - 6	14	81.073	115.47	145.23	210.00		
ACI MEPS T110 30% - 7	28	81.222	127.02	159.47	210.00		
ACI MEPS T110 30% - 8	28	80.627	147.38	186.39	210.00	172.47	82
ACI MEPS T110 30% - 9	28	81.307	136.78	171.54	210.00		
ACI MEPS T130 5% - 1	7	80.892	138.12	174.11	210.00		
ACI MEPS T130 5% - 2	7	82.087	135.66	168.52	210.00	171.67	82
ACI MEPS T130 5% - 3	7	80.935	136.83	172.39	210.00		
ACI MEPS T130 5% - 4	14	79.928	159.65	203.68	210.00		
ACI MEPS T130 5% - 5	14	80.161	161.29	205.17	210.00	204.01	97
ACI MEPS T130 5% - 6	14	80.521	160.45	203.19	210.00		
ACI MEPS T130 5% - 7	28	82.248	178.54	221.35	210.00		
ACI MEPS T130 5% - 8	28	82.312	179.43	222.28	210.00	221.41	105
ACI MEPS T130 5% - 9	28	82.494	178.47	220.60	210.00		
ACI MEPS T130 10% - 1	7	81.950	127.65	158.84	210.00		
ACI MEPS T130 10% - 2	7	81.937	125.09	155.67	210.00	157.40	75
ACI MEPS T130 10% - 3	7	81.585	126.17	157.70	210.00		
ACI MEPS T130 10% - 4	14	80.510	156.82	198.62	210.00		
ACI MEPS T130 10% - 5	14	80.457	149.62	189.63	210.00	193.71	92
ACI MEPS T130 10% - 6	14	81.137	153.47	192.88	210.00		
ACI MEPS T130 10% - 7	28	81.777	181.29	226.06	210.00		
ACI MEPS T130 10% - 8	28	82.709	172.17	212.26	210.00	218.67	104
ACI MEPS T130 10% - 9	28	82.666	176.49	217.70	210.00		
ACI MEPS T130 15% - 1	7	81.627	100.07	125.01	210.00	126.10	60



ACI MEPS T130 15% - 2	7	81.617	101.17	126.40	210.00		
ACI MEPS T130 15% - 3	7	80.383	100.04	126.90	210.00		
ACI MEPS T130 15% - 4	14	80.871	118.93	149.96	210.00		
ACI MEPS T130 15% - 5	14	81.318	118.36	148.42	210.00	149.16	71
ACI MEPS T130 15% - 6	14	81.158	118.66	149.09	210.00		
ACI MEPS T130 15% - 7	28	81.830	139.33	173.62	210.00		
ACI MEPS T130 15% - 8	28	81.991	138.62	172.40	210.00	173.16	82
ACI MEPS T130 15% - 9	28	81.734	139.05	173.48	210.00		
ACI MEPS T145 5% - 1	7	81.350	153.21	192.04	210.00		
ACI MEPS T145 5% - 2	7	81.884	149.11	185.69	210.00	188.60	90
ACI MEPS T145 5% - 3	7	81.937	151.13	188.08	210.00		
ACI MEPS T145 5% - 4	14	80.733	190.73	240.90	210.00		
ACI MEPS T145 5% - 5	14	81.020	196.40	247.18	210.00	243.72	116
ACI MEPS T145 5% - 6	14	81.521	194.32	243.06	210.00		
ACI MEPS T145 5% - 7	28	81.425	208.50	261.11	210.00		
ACI MEPS T145 5% - 8	28	80.436	203.34	257.78	210.00	260.15	124
ACI MEPS T145 5% - 9	28	80.203	205.72	261.55	210.00		
ACI MEPS T145 10% - 1	7	82.334	125.63	155.59	210.00		
ACI MEPS T145 10% - 2	7	81.681	132.65	165.60	210.00	160.98	77
ACI MEPS T145 10% - 3	7	82.162	130.32	161.74	210.00		
ACI MEPS T145 10% - 4	14	80.362	161.23	204.58	210.00		
ACI MEPS T145 10% - 5	14	80.776	168.92	213.24	210.00	208.55	99
ACI MEPS T145 10% - 6	14	81.148	165.39	207.83	210.00		
ACI MEPS T145 10% - 7	28	80.553	179.68	227.45	210.00		
ACI MEPS T145 10% - 8	28	80.330	178.89	227.08	210.00	227.00	108
ACI MEPS T145 10% - 9	28	80.574	178.95	226.47	210.00		
ACI MEPS T145 15% - 1	7	82.162	124.74	154.81	210.00		
ACI MEPS T145 15% - 2	7	81.884	120.14	149.61	210.00	152.26	73
ACI MEPS T145 15% - 3	7	82.087	122.64	152.35	210.00		
ACI MEPS T145 15% - 4	14	80.055	145.95	185.90	210.00		
ACI MEPS T145 15% - 5	14	81.052	146.46	184.26	210.00	185.03	88
ACI MEPS T145 15% - 6	14	80.680	146.32	184.93	210.00		
ACI MEPS T145 15% - 7	28	81.766	159.66	199.11	210.00		
ACI MEPS T145 15% - 8	28	81.761	160.04	199.60	210.00	199.18	95

ACI MEPS T145 15% - 9 28 81.948 159.78 198.82 210.00

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la tabla 102, se observa los resultados de la resistencia a compresión del concreto por el método Americano A.C.I.-211 con sustitución de MEPS en porcentajes a temperaturas controladas. Se realizaron 3 briquetas por cada tiempo de curado, porcentaje de MEPS y temperatura.

4.3.2.1.2 Resultado de pruebas a compresión simple método Modulo de Fineza de la combinación de los agregados con sustitución por MEPS

Tabla 103:

Resistencia a la compresión de $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$, método de diseño Modulo de Fineza de la combinación de agregados con MEPS, $a/c=0.56$.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN METODO MODULO DE FINEZA CON MEPS							
Descripción	Edad días	Área (cm ²)	Lectura del dial KN	Rotura (kg/cm ²)	Diseño (kg/cm ²)	Promedio $f'c$ (kg/cm ²)	% Promedio
MF Concreto Normal - 1	7	82.248	154.59	191.66	210.00		
MF Concreto Normal - 2	7	82.441	156.31	193.34	210.00	189.52	90
MF Concreto Normal - 3	7	82.709	148.90	183.57	210.00		
MF Concreto Normal - 4	14	82.752	176.63	217.65	210.00		
MF Concreto Normal - 5	14	80.754	183.17	231.29	210.00	225.47	107
MF Concreto Normal - 6	14	82.098	183.13	227.46	210.00		
MF Concreto Normal - 7	28	82.494	213.18	263.51	210.00		
MF Concreto Normal - 8	28	82.151	207.29	257.30	210.00	264.97	125
MF Concreto Normal - 9	28	82.409	221.51	274.09	210.00		
MF MEPS T110 5% - 1	7	81.980	137.83	171.44	210.00		
MF MEPS T110 5% - 2	7	82.194	137.49	170.57	210.00	171.57	81
MF MEPS T110 5% - 3	7	81.212	137.54	172.70	210.00		
MF MEPS T110 5% - 4	14	80.457	170.81	216.48	210.00		
MF MEPS T110 5% - 5	14	79.970	162.52	207.23	210.00	210.74	98
MF MEPS T110 5% - 6	14	80.861	165.34	208.50	210.00		



MF MEPS T110 5% - 7	28	80.956	187.39	236.03	210.00		
MF MEPS T110 5% - 8	28	80.309	189.59	240.73	210.00	237.86	111
MF MEPS T110 5% - 9	28	81.275	188.76	236.82	210.00		
MF MEPS T110 15% - 1	7	81.521	125.51	156.99	210.00		
MF MEPS T110 15% - 2	7	81.969	121.87	151.61	210.00	154.26	71
MF MEPS T110 15% - 3	7	81.670	123.49	154.18	210.00		
MF MEPS T110 15% - 4	14	80.224	140.08	178.05	210.00		
MF MEPS T110 15% - 5	14	81.222	148.83	186.85	210.00	182.63	84
MF MEPS T110 15% - 6	14	80.595	144.63	182.99	210.00		
MF MEPS T110 15% - 7	28	81.244	165.85	208.16	210.00		
MF MEPS T110 15% - 8	28	80.510	167.99	212.77	210.00	210.31	96
MF MEPS T110 15% - 9	28	80.967	166.75	210.01	210.00		
MF MEPS T110 30% - 1	7	82.023	101.74	126.48	210.00		
MF MEPS T110 30% - 2	7	81.895	105.73	131.65	210.00	129.36	59
MF MEPS T110 30% - 3	7	81.180	103.45	129.94	210.00		
MF MEPS T110 30% - 4	14	81.563	135.50	169.40	210.00		
MF MEPS T110 30% - 5	14	81.350	133.83	167.75	210.00	168.39	77
MF MEPS T110 30% - 6	14	81.595	134.45	168.02	210.00		
MF MEPS T110 30% - 7	28	81.297	146.48	183.73	210.00		
MF MEPS T110 30% - 8	28	80.701	144.57	182.67	210.00	183.06	83
MF MEPS T110 30% - 9	28	81.307	145.74	182.78	210.00		
MF MEPS T130 5% - 1	7	81.884	131.47	163.72	210.00		
MF MEPS T130 5% - 2	7	83.129	136.26	167.14	210.00	166.17	75
MF MEPS T130 5% - 3	7	81.595	134.14	167.64	210.00		
MF MEPS T130 5% - 4	14	80.776	171.58	216.60	210.00		
MF MEPS T130 5% - 5	14	80.325	164.12	208.35	210.00	212.71	95
MF MEPS T130 5% - 6	14	80.510	168.32	213.19	210.00		
MF MEPS T130 5% - 7	28	82.312	194.81	241.33	210.00		
MF MEPS T130 5% - 8	28	81.895	189.05	235.39	210.00	237.97	106
MF MEPS T130 5% - 9	28	81.884	190.45	237.17	210.00		
MF MEPS T130 10% - 1	7	81.884	115.51	143.84	210.00		
MF MEPS T130 10% - 2	7	82.258	118.64	147.07	210.00	145.51	65
MF MEPS T130 10% - 3	7	81.862	116.89	145.60	210.00		
MF MEPS T130 10% - 4	14	80.055	149.68	190.65	210.00	191.87	85



MF MEPS T130 10% - 5	14	80.214	152.66	194.07	210.00		
MF MEPS T130 10% - 6	14	80.521	150.74	190.89	210.00		
MF MEPS T130 10% - 7	28	81.638	163.85	204.66	210.00		
MF MEPS T130 10% - 8	28	82.055	170.04	211.31	210.00	206.82	91
MF MEPS T130 10% - 9	28	82.613	165.67	204.49	210.00		
MF MEPS T130 15% - 1	7	81.702	90.57	113.04	210.00		
MF MEPS T130 15% - 2	7	81.148	91.07	114.44	210.00	113.66	50
MF MEPS T130 15% - 3	7	81.254	90.44	113.49	210.00		
MF MEPS T130 15% - 4	14	82.409	118.00	146.01	210.00		
MF MEPS T130 15% - 5	14	81.724	118.43	147.76	210.00	147.05	64
MF MEPS T130 15% - 6	14	81.809	118.25	147.39	210.00		
MF MEPS T130 15% - 7	28	82.709	130.14	160.45	210.00		
MF MEPS T130 15% - 8	28	82.720	130.19	160.49	210.00	160.56	70
MF MEPS T130 15% - 9	28	82.655	130.30	160.74	210.00		
MF MEPS T145 5% - 1	7	82.076	163.28	202.86	210.00		
MF MEPS T145 5% - 2	7	81.702	158.92	198.34	210.00	201.16	87
MF MEPS T145 5% - 3	7	81.531	161.73	202.27	210.00		
MF MEPS T145 5% - 4	14	81.435	190.56	238.61	210.00		
MF MEPS T145 5% - 5	14	81.425	191.17	239.41	210.00	239.10	103
MF MEPS T145 5% - 6	14	81.297	190.78	239.29	210.00		
MF MEPS T145 5% - 7	28	81.691	214.55	267.81	210.00		
MF MEPS T145 5% - 8	28	81.244	212.10	266.21	210.00	267.12	115
MF MEPS T145 5% - 9	28	81.542	213.78	267.34	210.00		
MF MEPS T145 10% - 1	7	82.323	144.48	178.96	210.00		
MF MEPS T145 10% - 2	7	82.827	136.24	167.73	210.00	173.73	74
MF MEPS T145 10% - 3	7	82.312	140.85	174.49	210.00		
MF MEPS T145 10% - 4	14	80.712	144.18	182.15	210.00		
MF MEPS T145 10% - 5	14	81.489	155.25	194.27	210.00	187.76	80
MF MEPS T145 10% - 6	14	80.956	148.36	186.87	210.00		
MF MEPS T145 10% - 7	28	80.585	184.82	233.87	210.00		
MF MEPS T145 10% - 8	28	80.946	181.30	228.39	210.00	230.01	97
MF MEPS T145 10% - 9	28	81.734	182.56	227.76	210.00		
MF MEPS T145 15% - 1	7	81.606	127.76	159.64	210.00		
MF MEPS T145 15% - 2	7	81.809	136.24	169.81	210.00	164.63	69

MF MEPS T145 15% - 3	7	81.531	131.47	164.43	210.00		
MF MEPS T145 15% - 4	14	80.829	174.55	220.20	210.00		
MF MEPS T145 15% - 5	14	80.425	172.61	218.85	210.00	218.93	92
MF MEPS T145 15% - 6	14	81.222	173.43	217.73	210.00		
MF MEPS T145 15% - 7	28	80.999	194.86	245.31	210.00		
MF MEPS T145 15% - 8	28	80.436	193.69	245.54	210.00	245.16	103
MF MEPS T145 15% - 9	28	81.052	194.45	244.63	210.00		

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la tabla 103, se observa los resultados de la resistencia a compresión del concreto por el método de diseño Modulo de fineza de la combinación de agregados con sustitución de MEPS en porcentajes a temperaturas controladas. Se realizaron 3 briquetas por cada tiempo de curado, porcentaje de MEPS y temperatura.

4.3.2.1.3 Resultado de pruebas a compresión simple método WALKER con sustitución por MEPS

Tabla 104:

Resistencia a la compresión de $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$, método de diseño Walker con MEPS, $a/c=0.56$.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN METODO WALKER CON MEPS							
Descripción	Edad días	Área cm^2	Lectura del dial KN	Rotura (kg/cm^2)	Diseño (kg/cm^2)	Promedio $f'c$ (kg/cm^2)	% Promedio
W Concreto Normal - 1	7	82.109	161.06	200.02	210.00		
W Concreto Normal - 2	7	80.648	159.65	201.86	210.00	195.52	93
W Concreto Normal - 3	7	82.034	148.58	184.69	210.00		
W Concreto Normal - 4	14	81.031	196.79	247.64	210.00		
W Concreto Normal - 5	14	81.254	205.48	257.87	210.00	246.79	117
W Concreto Normal - 6	14	81.265	187.16	234.85	210.00		
W Concreto Normal - 7	28	80.722	211.44	267.09	210.00		
W Concreto Normal - 8	28	79.970	215.53	274.82	210.00	275.35	130
W Concreto Normal - 9	28	80.574	224.52	284.14	210.00		



W MEPS T110 5% - 1	7	81.852	144.77	180.35	210.00		
W MEPS T110 5% - 2	7	81.265	136.78	171.63	210.00	175.17	82
W MEPS T110 5% - 3	7	81.361	138.45	173.52	210.00		
W MEPS T110 5% - 4	14	80.013	163.54	208.42	210.00		
W MEPS T110 5% - 5	14	80.691	171.60	216.85	210.00	211.83	99
W MEPS T110 5% - 6	14	80.701	166.36	210.20	210.00		
W MEPS T110 5% - 7	28	80.235	190.83	242.52	210.00		
W MEPS T110 5% - 8	28	79.939	194.78	248.46	210.00	245.45	114
W MEPS T110 5% - 9	28	80.500	193.69	245.35	210.00		
W MEPS T110 15% - 1	7	81.830	114.68	142.90	210.00		
W MEPS T110 15% - 2	7	81.798	112.38	140.09	210.00	141.64	66
W MEPS T110 15% - 3	7	81.521	113.45	141.91	210.00		
W MEPS T110 15% - 4	14	80.861	142.64	179.88	210.00		
W MEPS T110 15% - 5	14	80.765	153.90	194.31	210.00	186.83	86
W MEPS T110 15% - 6	14	80.807	147.65	186.32	210.00		
W MEPS T110 15% - 7	28	80.563	165.87	209.94	210.00		
W MEPS T110 15% - 8	28	80.765	163.70	206.68	210.00	208.25	96
W MEPS T110 15% - 9	28	80.765	164.84	208.12	210.00		
W MEPS T110 30% - 1	7	82.527	104.15	128.69	210.00		
W MEPS T110 30% - 2	7	83.010	103.29	126.88	210.00	127.97	58
W MEPS T110 30% - 3	7	82.291	103.56	128.33	210.00		
W MEPS T110 30% - 4	14	81.617	116.38	145.40	210.00		
W MEPS T110 30% - 5	14	80.903	120.73	152.17	210.00	148.75	68
W MEPS T110 30% - 6	14	81.169	118.34	148.67	210.00		
W MEPS T110 30% - 7	28	80.744	138.11	174.42	210.00		
W MEPS T110 30% - 8	28	80.807	132.31	166.96	210.00	170.93	77
W MEPS T110 30% - 9	28	80.627	135.54	171.42	210.00		
W MEPS T130 5% - 1	7	82.205	138.39	171.66	210.00		
W MEPS T130 5% - 2	7	81.948	135.23	168.27	210.00	170.23	77
W MEPS T130 5% - 3	7	81.702	136.82	170.76	210.00		
W MEPS T130 5% - 4	14	80.489	167.66	212.41	210.00		
W MEPS T130 5% - 5	14	79.791	173.12	221.24	210.00	215.50	97
W MEPS T130 5% - 6	14	81.073	169.23	212.85	210.00		
W MEPS T130 5% - 7	28	82.141	191.25	237.42	210.00	233.31	104



W MEPS T130 5% - 8	28	82.194	185.13	229.67	210.00		
W MEPS T130 5% - 9	28	82.001	187.25	232.85	210.00		
W MEPS T130 10% - 1	7	82.087	124.33	154.44	210.00		
W MEPS T130 10% - 2	7	82.151	124.72	154.81	210.00	155.16	69
W MEPS T130 10% - 3	7	81.307	124.56	156.21	210.00		
W MEPS T130 10% - 4	14	81.052	153.95	193.68	210.00		
W MEPS T130 10% - 5	14	80.468	151.10	191.48	210.00	192.46	85
W MEPS T130 10% - 6	14	80.882	152.46	192.21	210.00		
W MEPS T130 10% - 7	28	82.205	175.35	217.51	210.00		
W MEPS T130 10% - 8	28	82.344	172.58	213.71	210.00	215.47	95
W MEPS T130 10% - 9	28	82.291	173.65	215.18	210.00		
W MEPS T130 15% - 1	7	82.838	96.82	119.18	210.00		
W MEPS T130 15% - 2	7	82.967	103.85	127.64	210.00	122.99	54
W MEPS T130 15% - 3	7	82.355	98.65	122.15	210.00		
W MEPS T130 15% - 4	14	81.393	115.29	144.44	210.00		
W MEPS T130 15% - 5	14	80.924	119.85	151.02	210.00	147.51	64
W MEPS T130 15% - 6	14	81.297	117.25	147.07	210.00		
W MEPS T130 15% - 7	28	82.591	140.08	172.95	210.00		
W MEPS T130 15% - 8	28	82.012	133.49	165.98	210.00	170.50	74
W MEPS T130 15% - 9	28	81.852	138.52	172.57	210.00		
W MEPS T145 5% - 1	7	80.924	156.27	196.91	210.00		
W MEPS T145 5% - 2	7	80.320	151.59	192.45	210.00	194.49	84
W MEPS T145 5% - 3	7	80.616	153.45	194.10	210.00		
W MEPS T145 5% - 4	14	81.745	195.01	243.26	210.00		
W MEPS T145 5% - 5	14	81.382	182.46	228.62	210.00	236.04	102
W MEPS T145 5% - 6	14	81.873	189.69	236.25	210.00		
W MEPS T145 5% - 7	28	80.468	205.58	260.51	210.00		
W MEPS T145 5% - 8	28	80.712	210.05	265.37	210.00	263.62	113
W MEPS T145 5% - 9	28	80.341	208.76	264.96	210.00		
W MEPS T145 10% - 1	7	82.034	125.34	155.80	210.00		
W MEPS T145 10% - 2	7	81.265	119.05	149.38	210.00	153.12	65
W MEPS T145 10% - 3	7	81.052	122.56	154.19	210.00		
W MEPS T145 10% - 4	14	80.871	144.72	182.48	210.00	187.82	80
W MEPS T145 10% - 5	14	80.977	153.33	193.08	210.00		



W MEPS T145 10% - 6	14	80.999	149.26	187.90	210.00		
W MEPS T145 10% - 7	28	81.233	169.77	213.11	210.00		
W MEPS T145 10% - 8	28	81.590	177.13	221.37	210.00	217.38	92
W MEPS T145 10% - 9	28	81.595	174.16	217.65	210.00		
W MEPS T145 15% - 1	7	81.980	139.17	173.11	210.00		
W MEPS T145 15% - 2	7	80.606	130.71	165.35	210.00	169.83	72
W MEPS T145 15% - 3	7	80.574	135.15	171.04	210.00		
W MEPS T145 15% - 4	14	80.648	158.93	200.95	210.00		
W MEPS T145 15% - 5	14	80.829	157.51	198.71	210.00	199.68	84
W MEPS T145 15% - 6	14	81.020	158.42	199.38	210.00		
W MEPS T145 15% - 7	28	80.013	178.88	227.97	210.00		
W MEPS T145 15% - 8	28	80.574	168.03	212.65	210.00	219.59	92
W MEPS T145 15% - 9	28	81.073	173.45	218.16	210.00		

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la tabla 104, se observa los resultados de la resistencia a compresión del concreto por el método de diseño WALKER con sustitución de MEPS en porcentajes a temperaturas controladas. Se realizaron 3 briquetas por cada tiempo de curado, porcentaje de MEPS y temperatura.

4.3.2.2 Resultados de ensayo de determinación de la densidad, absorción y volumen de vacíos

4.3.2.2.1 Resultados densidad, absorción y volumen de vacíos del concreto método ACI-211 por sustitución de MEPS

Tabla 105:

Resultados del cálculo de densidad, absorción y volumen de vacíos del concreto método ACI-211 con adición de MEPS.

Descripción	Días	Absorción (%)	Promedio Absorción (%)	Densidad Aparente (g/cm ³)	Promedio Densidad Aparente (g/cm ³)	Volumen de vacíos permeables (%)	Promedio Volumen de vacíos permeables (%)
ACI (CN) - 1	7	6.38	6.41	2.54	2.50	15.21	14.66



ACI (CN) - 2	7	6.43		2.46		14.11	
ACI (CN) - 3	14	6.35	5.91	2.47	2.41	14.57	13.11
ACI (CN) - 4	14	5.47		2.36		11.64	
ACI (CN) - 5	28	6.53	6.50	2.44	2.42	14.20	14.30
ACI (CN) - 6	28	6.47		2.41		14.39	
ACI MEP T110 5% - 1	7	5.93	5.84	2.40	2.41	12.92	12.79
ACI MEP T110 5% - 2	7	5.76		2.42		12.66	
ACI MEP T110 5% - 3	14	5.87	5.74	2.38	2.38	12.73	12.40
ACI MEP T110 5% - 4	14	5.62		2.39		12.07	
ACI MEP T110 5% - 5	28	5.85	5.82	2.44	2.45	12.70	13.07
ACI MEP T110 5% - 6	28	5.79		2.46		13.44	
ACI MEP T110 15% - 1	7	5.62	5.67	2.30	2.34	11.90	12.43
ACI MEP T110 15% - 2	7	5.73		2.38		12.96	
ACI MEP T110 15% - 3	14	5.67	5.75	2.32	2.31	12.77	12.86
ACI MEP T110 15% - 4	14	5.82		2.29		12.94	
ACI MEP T110 15% - 5	28	6.05	5.94	2.35	2.35	12.66	12.99
ACI MEP T110 15% - 6	28	5.83		2.35		13.32	
ACI MEP T110 30% - 1	7	6.77	6.98	2.19	2.19	13.13	13.99
ACI MEP T110 30% - 2	7	7.18		2.20		14.84	
ACI MEP T110 30% - 3	14	7.23	6.93	2.28	2.22	14.38	14.03
ACI MEP T110 30% - 4	14	6.64		2.17		13.68	
ACI MEP T110 30% - 5	28	6.77	6.79	2.29	2.28	14.36	14.19
ACI MEP T110 30% - 6	28	6.80		2.27		14.01	
ACI MEP T130 5% - 1	7	4.86	4.75	2.39	2.35	10.93	10.62
ACI MEP T130 5% - 2	7	4.63		2.30		10.32	
ACI MEP T130 5% - 3	14	4.58	4.63	2.33	2.34	10.36	10.36
ACI MEP T130 5% - 4	14	4.67		2.35		10.36	
ACI MEP T130 5% - 5	28	4.76	4.70	2.39	2.38	11.53	10.83
ACI MEP T130 5% - 6	28	4.64		2.37		10.13	
ACI MEP T130 10% - 1	7	4.46	4.35	2.26	2.24	9.41	9.25
ACI MEP T130 10% - 2	7	4.25		2.22		9.08	
ACI MEP T130 10% - 3	14	4.33	4.30	2.27	2.25	9.67	9.31
ACI MEP T130 10% - 4	14	4.28		2.23		8.96	
ACI MEP T130 10% - 5	28	4.08	4.21	2.33	2.31	9.99	9.76
ACI MEP T130 10% - 6	28	4.33		2.30		9.52	
ACI MEP T130 15% - 1	7	4.59	4.67	2.21	2.18	9.65	10.04
ACI MEP T130 15% - 2	7	4.75		2.16		10.43	
ACI MEP T130 15% - 3	14	4.52	4.58	2.24	2.19	9.44	9.34
ACI MEP T130 15% - 4	14	4.63		2.14		9.24	
ACI MEP T130 15% - 5	28	4.52	4.53	2.22	2.15	9.57	9.66
ACI MEP T130 15% - 6	28	4.53		2.08		9.76	
ACI MEP T145 5% - 1	7	4.81	4.86	2.28	2.26	11.09	10.77
ACI MEP T145 5% - 2	7	4.90		2.25		10.44	
ACI MEP T145 5% - 3	14	4.62	4.70	2.38	2.38	10.13	10.51
ACI MEP T145 5% - 4	14	4.77		2.38		10.88	
ACI MEP T145 5% - 5	28	4.76	4.81	2.38	2.36	11.11	10.79
ACI MEP T145 5% - 6	28	4.87		2.34		10.46	

ACI MEP T145 10% - 1	7	4.93	5.11	2.24	2.27	10.43	10.91
ACI MEP T145 10% - 2	7	5.30		2.31		11.39	
ACI MEP T145 10% - 3	14	4.90	4.91	2.22	2.23	10.28	10.19
ACI MEP T145 10% - 4	14	4.92		2.23		10.11	
ACI MEP T145 10% - 5	28	5.08	4.96	2.31	2.32	10.98	10.67
ACI MEP T145 10% - 6	28	4.84		2.33		10.37	
ACI MEP T145 15% - 1	7	5.80	5.80	2.22	2.23	12.56	12.37
ACI MEP T145 15% - 2	7	5.79		2.24		12.18	
ACI MEP T145 15% - 3	14	5.83	5.73	2.20	2.18	11.83	11.54
ACI MEP T145 15% - 4	14	5.63		2.15		11.25	
ACI MEP T145 15% - 5	28	5.74	5.80	2.22	2.22	12.51	12.13
ACI MEP T145 15% - 6	28	5.86		2.22		11.74	

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

Interpretación: En la tabla 105, se observa los resultados de densidad, absorción y volumen de vacíos del concreto por el método de diseño ACI-211 con sustitución de MEPS en porcentajes a temperaturas controladas. Se realizaron 2 muestras obtenidas de una probeta de concreto por cada tiempo de curado, porcentaje de MEPS y temperatura.

4.3.2.2 Resultados densidad, absorción y volumen de vacíos del concreto método

Modulo de Fineza de la combinación de los agregados por sustitución de MEPS

Tabla 106:

Resultados del cálculo de densidad, absorción y volumen de vacíos del concreto método módulo de fineza de la combinación de los agregados por sustitución de MEPS.

Descripción	Días	Absorción (%)	Promedio Absorción (%)	Densidad Aparente (g/cm ³)	Promedio Densidad Aparente (g/cm ³)	Volumen de vacíos permeables (%)	Promedio Volumen de vacíos permeables (%)
MF (CN) - 1	7	6.94	6.80	2.51	2.49	16.00	15.21
MF (CN) - 2	7	6.66		2.48		14.42	
MF (CN) - 3	14	6.56	6.64	2.44	2.46	14.85	14.68
MF (CN) - 4	14	6.72		2.48		14.51	
MF (CN) - 5	28	6.65	6.68	2.55	2.55	15.20	15.43
MF (CN) - 6	28	6.70		2.54		15.66	
MF MEP T110 5% - 1	7	5.31	5.29	2.43	2.42	12.34	12.14
MF MEP T110 5% - 2	7	5.26		2.41		11.94	
MF MEP T110 5% - 3	14	5.17	5.10	2.40	2.34	11.28	11.22
MF MEP T110 5% - 4	14	5.03		2.27		11.16	



MF MEP T110 5% - 5	28	5.23	5.28	2.43	2.44	11.77	12.24
MF MEP T110 5% - 6	28	5.33		2.44		12.72	
MF MEP T110 15% - 1	7	5.50	5.54	2.31	2.31	11.54	11.93
MF MEP T110 15% - 2	7	5.59		2.30		12.32	
MF MEP T110 15% - 3	14	5.78	5.65	2.31	2.25	12.45	11.97
MF MEP T110 15% - 4	14	5.51		2.20		11.50	
MF MEP T110 15% - 5	28	5.71	5.63	2.33	2.31	12.64	12.43
MF MEP T110 15% - 6	28	5.55		2.29		12.22	
MF MEP T110 30% - 1	7	5.83	5.73	2.23	2.20	12.00	11.59
MF MEP T110 30% - 2	7	5.64		2.18		11.18	
MF MEP T110 30% - 3	14	5.63	5.73	2.20	2.19	11.97	12.10
MF MEP T110 30% - 4	14	5.84		2.17		12.22	
MF MEP T110 30% - 5	28	5.88	5.92	2.26	2.26	12.02	12.53
MF MEP T110 30% - 6	28	5.95		2.27		13.04	
MF MEP T130 5% - 1	7	4.83	4.99	2.27	2.28	10.61	10.93
MF MEP T130 5% - 2	7	5.16		2.29		11.25	
MF MEP T130 5% - 3	14	4.90	4.89	2.29	2.31	10.83	10.64
MF MEP T130 5% - 4	14	4.87		2.34		10.44	
MF MEP T130 5% - 5	28	4.80	4.83	2.31	2.29	10.85	10.86
MF MEP T130 5% - 6	28	4.86		2.27		10.88	
MF MEP T130 10% - 1	7	4.25	4.08	2.29	2.27	9.88	9.11
MF MEP T130 10% - 2	7	3.92		2.25		8.34	
MF MEP T130 10% - 3	14	4.02	3.98	2.20	2.22	8.84	9.05
MF MEP T130 10% - 4	14	3.95		2.23		9.27	
MF MEP T130 10% - 5	28	3.97	4.01	2.23	2.25	8.64	9.09
MF MEP T130 10% - 6	28	4.04		2.27		9.53	
MF MEP T130 15% - 1	7	4.39	4.46	2.08	2.17	9.04	9.64
MF MEP T130 15% - 2	7	4.53		2.27		10.24	
MF MEP T130 15% - 3	14	4.65	4.57	2.16	2.19	9.57	9.44
MF MEP T130 15% - 4	14	4.48		2.23		9.30	
MF MEP T130 15% - 5	28	4.64	4.55	2.34	2.32	10.04	10.22
MF MEP T130 15% - 6	28	4.45		2.29		10.40	
MF MEP T145 5% - 1	7	5.09	5.04	2.33	2.32	11.36	11.31
MF MEP T145 5% - 2	7	4.99		2.31		11.26	
MF MEP T145 5% - 3	14	4.94	4.92	2.37	2.36	10.73	10.65
MF MEP T145 5% - 4	14	4.89		2.35		10.56	
MF MEP T145 5% - 5	28	4.83	4.87	2.39	2.35	10.55	10.63
MF MEP T145 5% - 6	28	4.91		2.31		10.70	
MF MEP T145 10% - 1	7	4.84	4.96	2.31	2.31	11.12	11.31
MF MEP T145 10% - 2	7	5.08		2.32		11.50	
MF MEP T145 10% - 3	14	4.93	5.05	2.29	2.30	10.60	10.75
MF MEP T145 10% - 4	14	5.17		2.30		10.90	
MF MEP T145 10% - 5	28	5.10	5.02	2.29	2.26	10.72	10.69
MF MEP T145 10% - 6	28	4.95		2.22		10.66	
MF MEP T145 15% - 1	7	4.87	4.69	2.19	2.20	10.54	10.13
MF MEP T145 15% - 2	7	4.50		2.21		9.72	
MF MEP T145 15% - 3	14	4.41	4.46	2.28	2.29	10.08	10.13

MF MEP T145 15% - 4	14	4.51		2.31		10.18	
MF MEP T145 15% - 5	28	4.70	4.74	2.28	2.26	9.92	10.33
MF MEP T145 15% - 6	28	4.78		2.24		10.74	

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

Interpretación: En la tabla 106, se observa los resultados de densidad, absorción y volumen de vacíos del concreto por el método de diseño Modulo de fineza de la combinación de agregados con sustitución de MEPS en porcentajes a temperaturas controladas. Se realizaron 2 muestras obtenidas de una probeta de concreto por cada tiempo de curado, porcentaje de MEPS y temperatura.

4.3.2.2.3 Resultados densidad, absorción y volumen de vacíos del concreto método

WALKER con adición de MEPS

Tabla 107:

Resultados del cálculo de densidad, absorción y volumen de vacíos del concreto método

WALKER por sustitución de MEPS.

Descripción	Días	Absorción (%)	Promedio Absorción (%)	Densidad Aparente (g/cm ³)	Promedio Densidad Aparente (g/cm ³)	Volumen de vacíos permeables (%)	Promedio Volumen de vacíos permeables (%)
W (CN) - 1	7	7.37	7.67	2.46	2.47	16.04	16.46
W (CN) - 2	7	7.97		2.47		16.88	
W (CN) - 3	14	7.09	6.95	2.48	2.48	15.84	15.65
W (CN) - 4	14	6.81		2.49		15.45	
W (CN) - 5	28	7.67	7.59	2.42	2.45	16.06	16.25
W (CN) - 6	28	7.51		2.49		16.43	
W MEP T110 5% - 1	7	5.58	5.65	2.37	2.37	12.67	12.55
W MEP T110 5% - 2	7	5.72		2.38		12.42	
W MEP T110 5% - 3	14	5.42	5.48	2.35	2.34	12.55	12.23
W MEP T110 5% - 4	14	5.54		2.33		11.91	
W MEP T110 5% - 5	28	5.64	5.67	2.37	2.37	12.04	12.22
W MEP T110 5% - 6	28	5.71		2.36		12.39	
W MEP T110 15% - 1	7	4.24	4.19	2.25	2.25	9.92	9.82
W MEP T110 15% - 2	7	4.15		2.26		9.72	
W MEP T110 15% - 3	14	4.10	4.12	2.32	2.32	8.94	9.31
W MEP T110 15% - 4	14	4.14		2.32		9.67	
W MEP T110 15% - 5	28	4.24	4.25	2.29	2.31	9.07	9.69
W MEP T110 15% - 6	28	4.25		2.33		10.31	



W MEP T110 30% - 1	7	6.81	6.81	2.20	2.20	13.51	13.88
W MEP T110 30% - 2	7	6.81		2.20		14.24	
W MEP T110 30% - 3	14	6.87	6.78	2.18	2.20	13.27	13.42
W MEP T110 30% - 4	14	6.68		2.21		13.57	
W MEP T110 30% - 5	28	6.82	6.74	2.16	2.14	13.30	13.41
W MEP T110 30% - 6	28	6.66		2.12		13.52	
W MEP T130 5% - 1	7	5.08	4.94	2.23	2.28	11.09	11.03
W MEP T130 5% - 2	7	4.80		2.33		10.98	
W MEP T130 5% - 3	14	5.00	4.97	2.29	2.29	10.91	10.78
W MEP T130 5% - 4	14	4.93		2.30		10.66	
W MEP T130 5% - 5	28	4.84	4.88	2.37	2.39	10.80	11.05
W MEP T130 5% - 6	28	4.92		2.42		11.30	
W MEP T130 10% - 1	7	4.50	4.46	2.26	2.28	10.40	10.17
W MEP T130 10% - 2	7	4.42		2.30		9.94	
W MEP T130 10% - 3	14	4.44	4.50	2.25	2.25	9.55	9.56
W MEP T130 10% - 4	14	4.56		2.25		9.56	
W MEP T130 10% - 5	28	4.61	4.66	2.29	2.26	10.27	10.03
W MEP T130 10% - 6	28	4.72		2.24		9.78	
W MEP T130 15% - 1	7	4.69	4.78	2.06	2.04	9.05	9.33
W MEP T130 15% - 2	7	4.87		2.01		9.61	
W MEP T130 15% - 3	14	4.96	4.73	2.07	2.06	10.21	9.45
W MEP T130 15% - 4	14	4.51		2.05		8.70	
W MEP T130 15% - 5	28	4.50	4.55	2.03	2.02	8.91	9.04
W MEP T130 15% - 6	28	4.61		2.01		9.16	
W MEP T145 5% - 1	7	4.87	4.63	2.24	2.28	10.72	10.48
W MEP T145 5% - 2	7	4.40		2.32		10.23	
W MEP T145 5% - 3	14	4.68	4.65	2.40	2.39	11.36	11.01
W MEP T145 5% - 4	14	4.62		2.38		10.65	
W MEP T145 5% - 5	28	4.80	4.81	2.33	2.31	11.27	11.07
W MEP T145 5% - 6	28	4.82		2.29		10.87	
W MEP T145 10% - 1	7	5.00	4.94	2.11	2.13	10.47	10.52
W MEP T145 10% - 2	7	4.87		2.15		10.57	
W MEP T145 10% - 3	14	5.11	5.03	2.17	2.18	10.21	10.33
W MEP T145 10% - 4	14	4.95		2.18		10.45	
W MEP T145 10% - 5	28	4.98	4.92	2.24	2.26	10.80	10.62
W MEP T145 10% - 6	28	4.86		2.27		10.44	
W MEP T145 15% - 1	7	4.66	4.60	2.16	2.16	9.84	9.61
W MEP T145 15% - 2	7	4.55		2.15		9.38	
W MEP T145 15% - 3	14	4.76	4.75	2.23	2.22	10.05	10.46
W MEP T145 15% - 4	14	4.73		2.22		10.87	
W MEP T145 15% - 5	28	4.71	4.73	2.10	2.17	9.96	10.15
W MEP T145 15% - 6	28	4.75		2.24		10.34	

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

Interpretación: En la tabla 107, se observa los resultados de densidad, absorción y volumen de vacíos del concreto por el método de diseño WALKER con sustitución de

MEPS en porcentajes a temperaturas controladas. Se realizaron 2 muestras obtenidas de una probeta de concreto por cada tiempo de curado, porcentaje de MEPS y temperatura.

4.4 RESULTADO DE LOS MODELOS DE REDES NEURONALES ARTIFICIALES

4.4.1 Resultados de los modelos de RNA para la resistencia a la compresión.

4.4.1.1 Resultados de modelo RNA_FC_A para 16 variables de entrada.

Tabla 108:

Resultado del cálculo del MSE correspondiente al número de neuronas para el modelo RNA_FC_A.

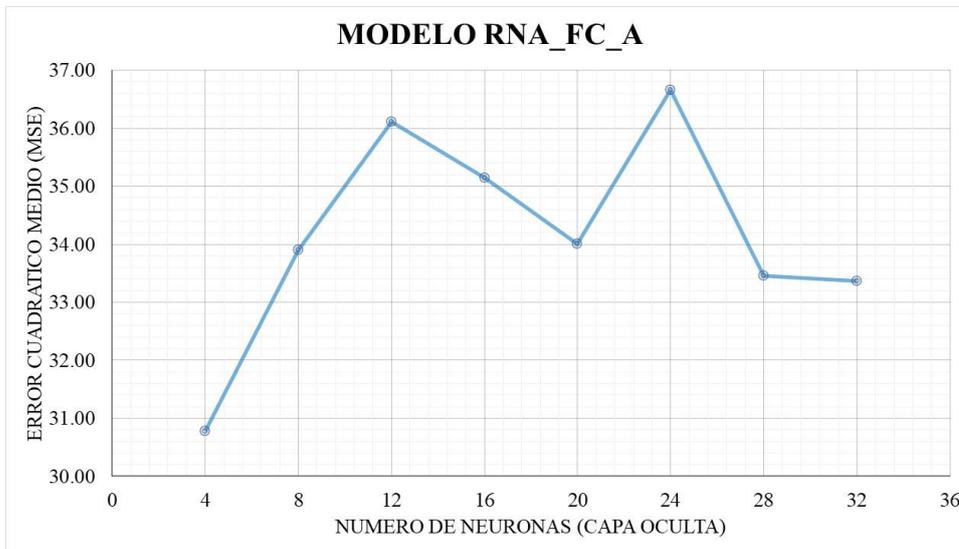
Modelo RNA_FC_A	
Numero de Neuronas	Error Cuadrático Medio (MSE)
4	30.78
8	33.90
12	36.12
16	35.14
20	34.01
24	36.67
28	33.46
32	33.36

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la tabla 108 se observa el resultado del error cuadrático medio MSE respecto al número de neuronas en la capa oculta para el modelo RNA_FC_A. Donde el valor menor de error cuadrático medio MSE es de 30.78 correspondiente a 4 neuronas en la capa oculta, el cual será utilizado seleccionado para su evaluación.

Figura 70:

Gráfico número de neuronas vs error cuadrático medio MSE, modelo RNA_FC_A.



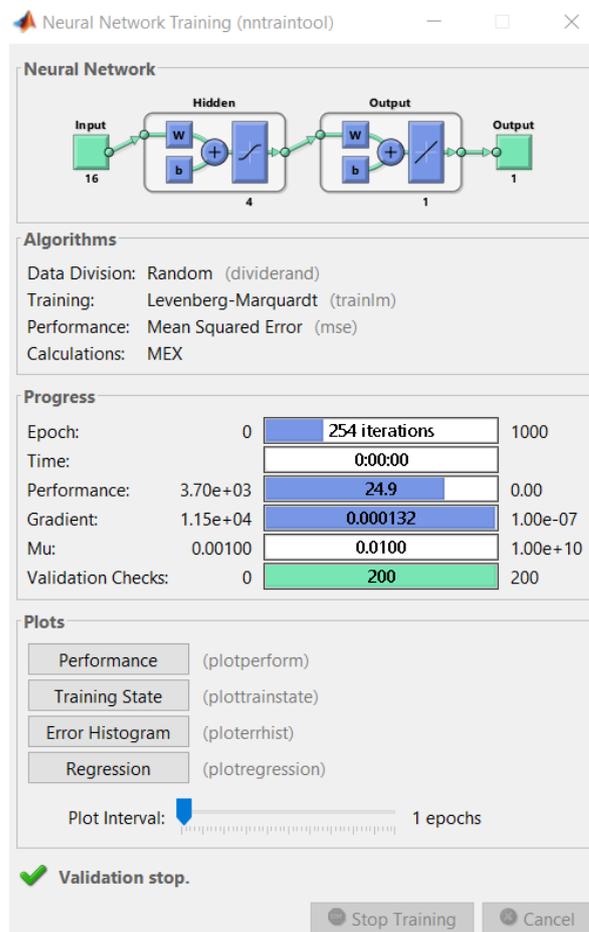
Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la figura 70 se observa la gráfica del número de neuronas vs el error cuadrático medio MSE para un modelo RNA_FC_A. Donde se seleccionó como RNA que tiene un menor error cuadrático medio MSE el cual corresponde 4 neuronas en la capa oculta.

4.4.1.1.1 Resultados del modelo RNA_FC_A con 4 neuronas en la capa oculta.

Figura 71:

Modelo de RNA_FC_A con 4 neuronas en la capa oculta.

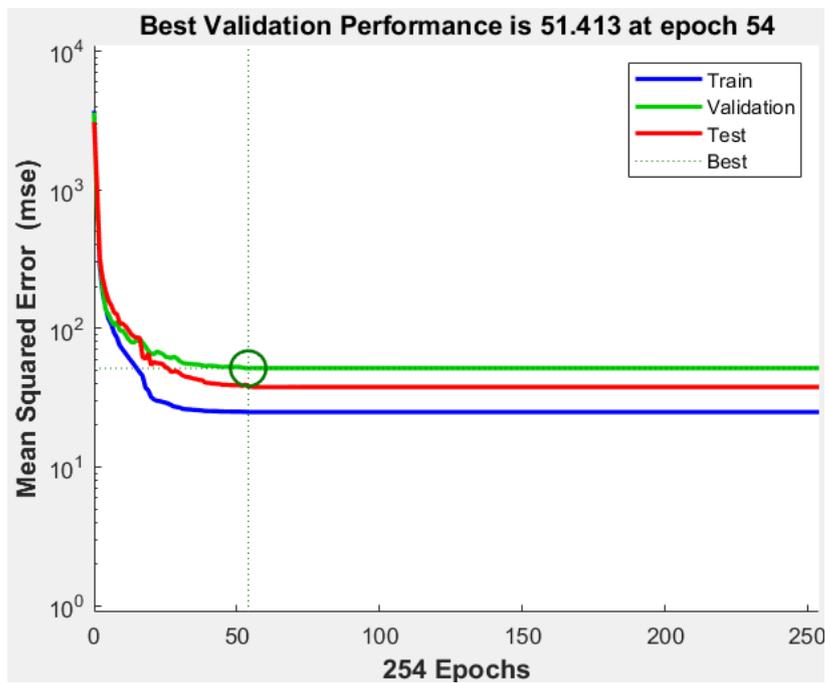


Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la figura 71 mostrada se observa el reporte del entrenamiento del modelo RNA_FC_A de acuerdo a los parámetros definidos en etapa de entrenamiento de la RNA para 16 variables de entrada con 4 neuronas en la capa oculta y una variable de salida.

Figura 72:

Performance del modelo de RNA_FC_A con 4 neuronas en la capa oculta.

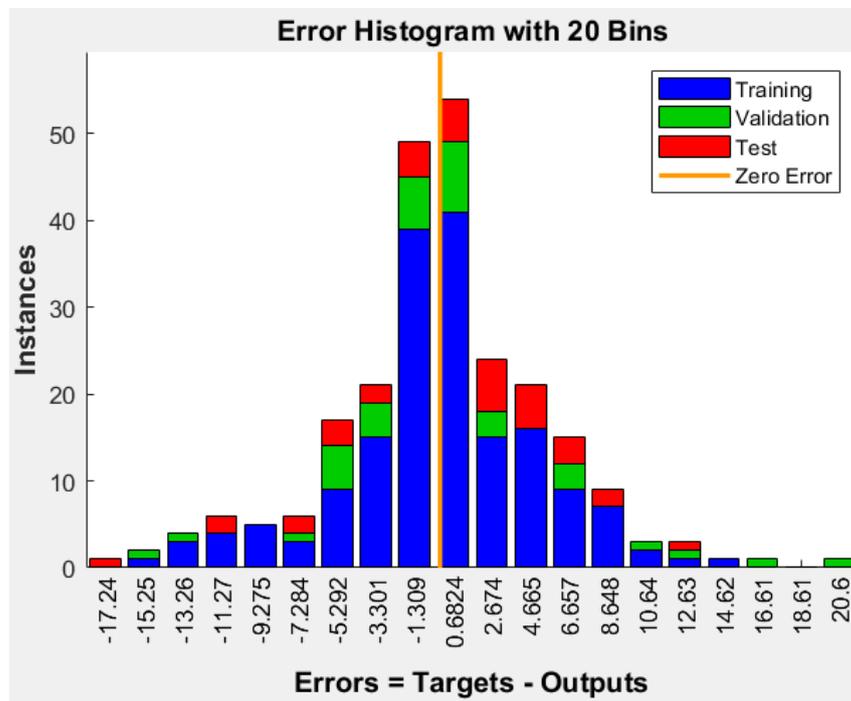


Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la figura 72 se observa el performance del modelo de RNA_FC_A con 4 neuronas en la capa oculta. Donde la mejor época donde se encuentra el mínimo error cuadrático medio MSE es la época 54 de 254 épocas.

Figura 73:

Histograma del error en el modelo de RNA_FC_A con 4 neuronas en la capa oculta.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la figura 73, se muestra el histograma de errores observándose que la concentración de los errores tanto en el entrenamiento, validación y test; se encuentra en el cero lo cual nos asegura una buena predicción del a resistencia la compresión del concreto f'c.

4.4.1.1.1 Extracción de los pesos de las capas del modelo RNA_FC_A.

Tabla 109:

Pesos W1 respecto a 16 variables de entrada y 4 neuronas en la capa oculta.

Peso W1															
-12.0	10.3	-5.3	0.1	-0.7	0.6	-0.1	-0.1	0.1	7.6	-0.4	2.2	1.6	2.5	-0.3	-1.3
-9.0	-7.6	-8.7	-129.9	64.0	110.8	-105.0	-28.7	-23.2	3.1	-2.5	0.9	-0.2	-0.1	-0.4	0.4
1.4	2.0	2.5	17.6	-13.0	-17.2	14.3	0.5	5.2	10.0	-3.3	-0.7	0.9	0.9	0.4	-0.9
-1.1	-0.6	-1.7	-85.4	57.3	87.2	-68.7	-2.1	-26.2	0.1	1.1	0.9	0.1	-0.9	-0.5	1.1

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la tabla 109, se muestra el resultado de los pesos W1 respecto a las 16 variables de entrada con las 4 neuronas en la capa oculta.

Tabla 110:

Pesos W2 respecto a las 4 neuronas en la capa oculta y la variable de salida.

Peso W2
-0.6 -2.3 1.2 0.6

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la tabla 110, se muestra el resultado de los pesos W2 respecto a las 4 neuronas en la capa oculta y la variable de salida.

4.4.1.2 Resultados de modelo RNA_FC_B para 13 variables de entrada.

Tabla 111:

Resultado del cálculo del MSE correspondiente al número de neuronas para el modelo RNA_FC_B.

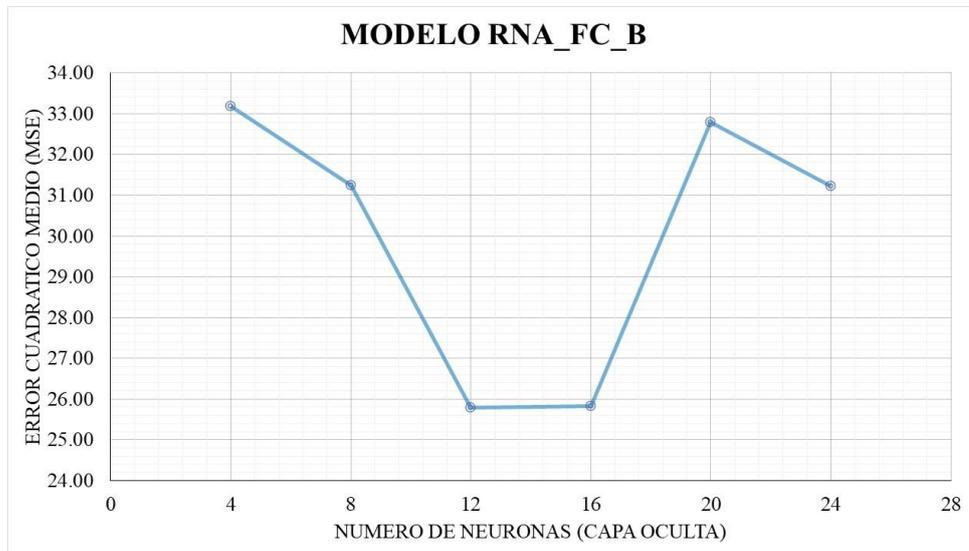
Modelo RNA_FC_B	
Numero de Neuronas	Error Cuadrático Medio (MSE)
4	33.18
8	31.25
12	25.79
16	25.83
20	32.79
24	31.22

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la Tabla 111, se observa el resultado del error cuadrático medio MSE respecto al número de neuronas en la capa oculta para el modelo RNA_FC_B. Donde el valor menor de error cuadrático medio MSE es de 25.79 correspondiente a 12 neuronas en la capa oculta, el cual será utilizado seleccionado para su evaluación.

Figura 74:

Gráfico número de neuronas vs error cuadrático medio MSE, modelo RNA_FC_B.



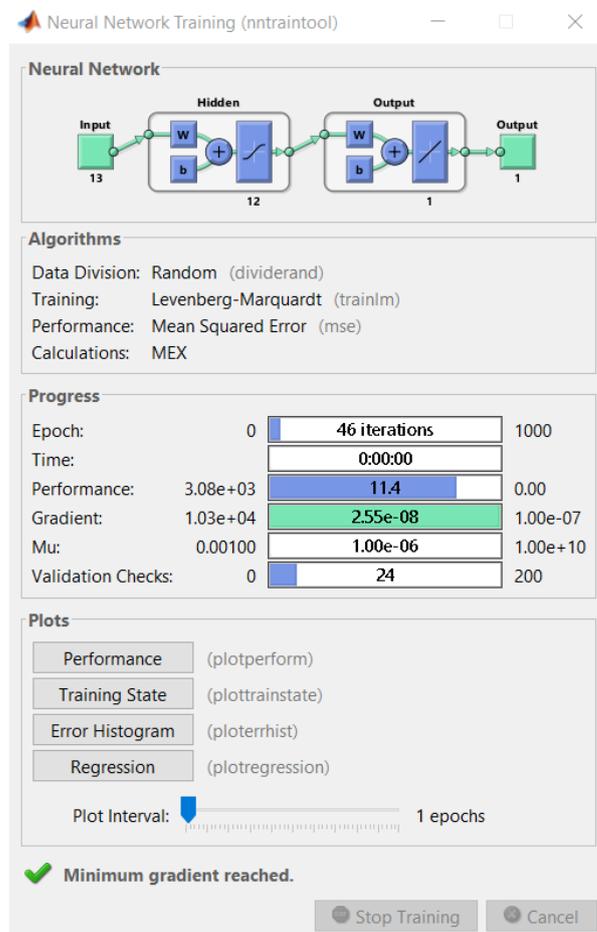
Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la figura 74, se observa la gráfica del número de neuronas vs el error cuadrático medio MSE para un modelo RNA_FC_B. Donde se seleccionó como RNA que tiene un menor error cuadrático medio MSE el cual corresponde 12 neuronas en la capa oculta.

4.4.1.2.1 Resultados del modelo RNA_FC_B con 12 neuronas en la capa oculta.

Figura 75:

Modelo de RNA_FC_B con 12 neuronas en la capa oculta.

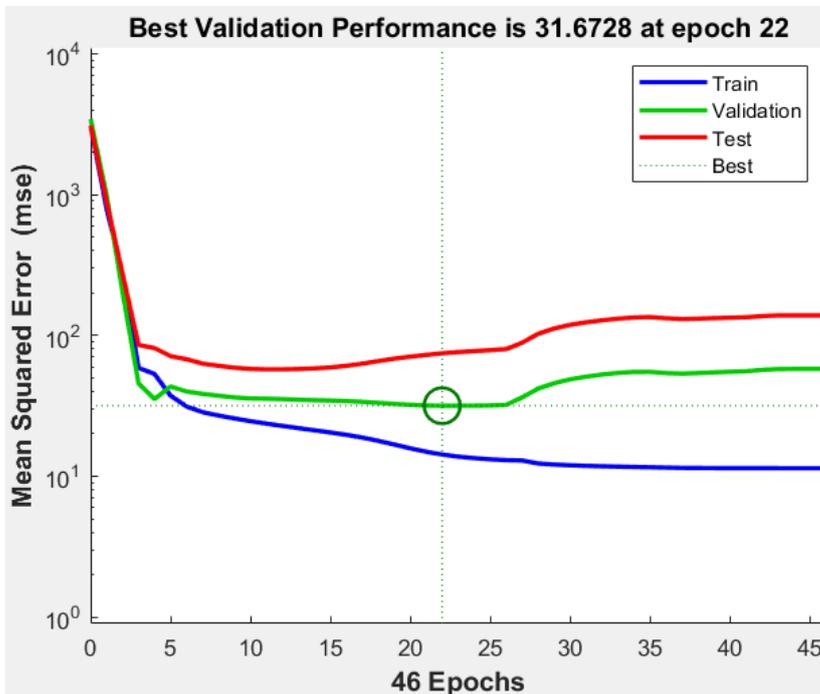


Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la figura 75, mostrada a continuación se observa el reporte del entrenamiento del modelo RNA_FC_B de acuerdo a los parámetros definidos en etapa de entrenamiento de la RNA para 13 variables de entrada con 12 neuronas en la capa oculta y una variable de salida.

Figura 76:

Performance del modelo de RNA_FC_B con 12 neuronas en la capa oculta.

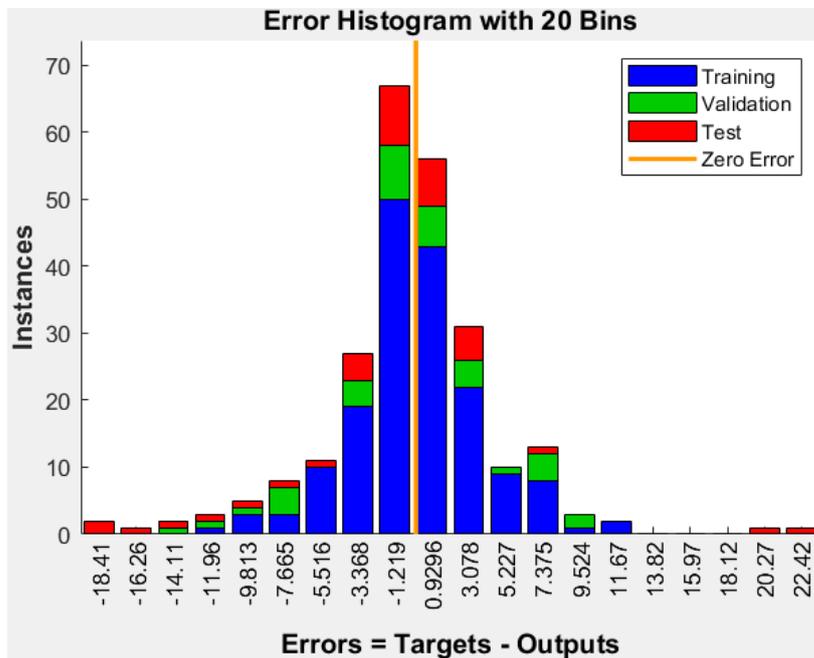


Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la figura 76, se observa el performance del modelo de RNA_FC_B con 12 neuronas en la capa oculta. Donde la mejora época donde se encuentra el mínimo error cuadrático medio MSE es la época 22 de 46 épocas.

Figura 77:

Histograma del error en el modelo de RNA_FC_B con 12 neuronas en la capa oculta.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la figura 77, se muestra el histograma de errores observándose que la concentración de los errores tanto en el entrenamiento, validación y test; se encuentra en el cero lo cual nos asegura una buena predicción del a resistencia la compresión del concreto f'c.

4.4.1.2.1.1 Extracción de los pesos de las capas del modelo RNA_FC_B.

Tabla 112:

Pesos W1 respecto a 13 variables de entrada y 12 neuronas en la capa oculta.

Pesos W1												
-0.5	-0.5	-0.7	0.2	-0.2	0.5	-0.7	-0.6	0.2	0.5	0.1	-0.2	0.4
-0.1	-0.8	-0.1	0.6	-0.6	-0.7	0.0	-0.7	-0.3	0.7	-0.6	1.2	0.7
0.2	-0.5	0.4	0.3	0.6	-0.5	-0.6	0.8	0.6	-0.8	-0.2	-0.9	-0.9
-0.3	-0.3	0.1	0.3	-0.1	0.6	-0.7	0.1	0.3	-0.5	0.4	0.2	-1.0
-0.1	-0.6	-0.8	-0.3	-0.2	-0.8	0.5	0.3	-0.4	0.9	0.6	0.9	-0.7
-0.3	-0.2	-0.3	-0.1	-0.3	-0.8	-0.2	-1.5	-0.5	-0.3	0.9	0.8	-0.6
-0.1	0.5	-0.1	0.1	-0.1	-0.9	-0.5	0.9	1.0	0.0	-0.2	0.6	0.5
-0.5	1.0	-0.3	-0.9	-0.9	0.2	0.0	0.1	-0.4	-0.4	-0.2	0.0	0.5
0.2	0.3	0.3	0.4	-0.5	-0.4	0.0	1.9	-0.3	-0.3	0.1	-0.6	0.5
0.0	0.5	-0.1	-0.7	-0.8	0.4	0.6	-0.3	0.6	-0.7	0.4	0.6	-0.4
0.0	-0.5	0.1	-0.7	0.5	0.4	-0.8	-0.3	-0.3	-0.2	0.9	-0.6	0.5
0.0	-0.7	-0.3	-0.7	0.9	0.6	0.0	0.8	0.3	-0.4	0.6	1.4	1.2

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la tabla 112, se muestra el resultado de los pesos W1 respecto a las 13 variables de entrada con las 12 neuronas en la capa oculta.

Tabla 113:

Pesos W2 respecto a las 12 neuronas en la capa oculta y la variable de salida.

Peso W2											
-0.2	-0.9	0.7	-0.7	1.2	-1.3	-0.2	0.3	-0.9	-0.5	0.3	-0.6

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la tabla 113, se muestra el resultado de los pesos W2 respecto a las 12 neuronas en la capa oculta y la variable de salida.

4.4.1.3 Resultados de modelo RNA_FC_C para 10 variables de entrada.

Tabla 114:

Resultado del cálculo del MSE correspondiente al número de neuronas para el modelo RNA_FC_C.

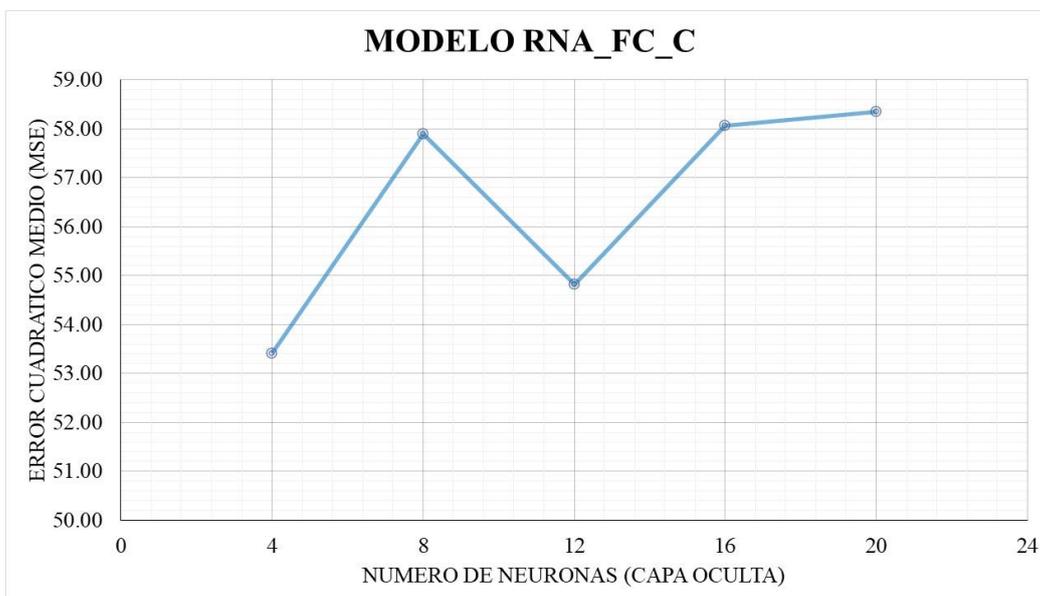
Modelo RNA_FC_C	
Numero de Neuronas	Error Cuadrático Medio (MSE)
4	53.41
8	57.90
12	54.82
16	58.06
20	58.35

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la Tabla 114, se observa el resultado del error cuadrático medio MSE respecto al número de neuronas en la capa oculta para el modelo RNA_FC_C. Donde el valor menor de error cuadrático medio MSE es de 53.41 correspondiente a 4 neuronas en la capa oculta, el cual será utilizado seleccionando para su evaluación.

Figura 78:

Gráfico número de neuronas vs error cuadrático medio MSE, modelo RNA_FC_C.



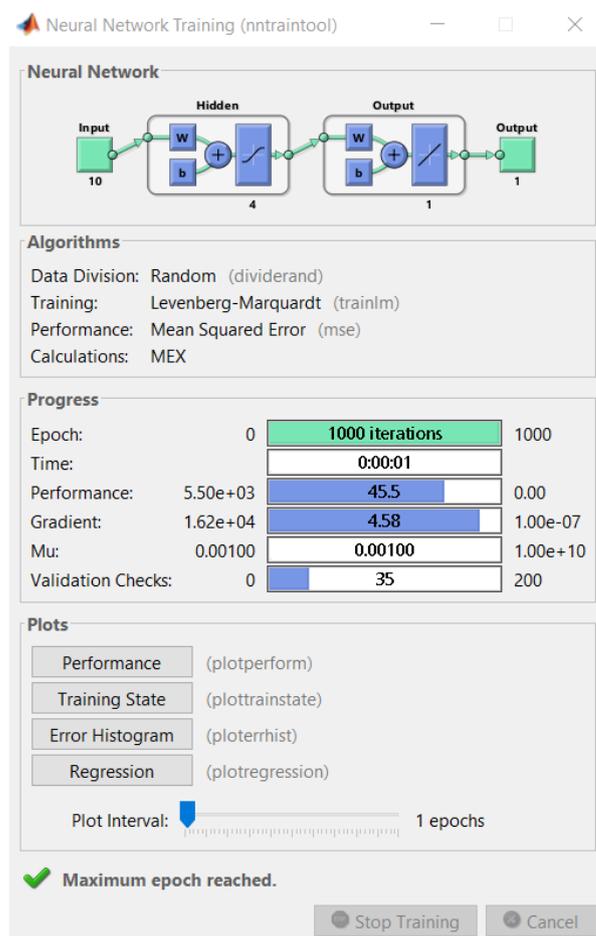
Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la figura 78, se observa la gráfica del número de neuronas vs el error cuadrático medio MSE para un modelo RNA_FC_C. Donde se seleccionó como RNA que tiene un menor error cuadrático medio MSE el cual corresponde 4 neuronas en la capa oculta.

4.4.1.3.1 Resultados del modelo RNA_FC_C con 4 neuronas en la capa oculta.

Figura 79:

Modelo de RNA_FC_C con 4 neuronas en la capa oculta.



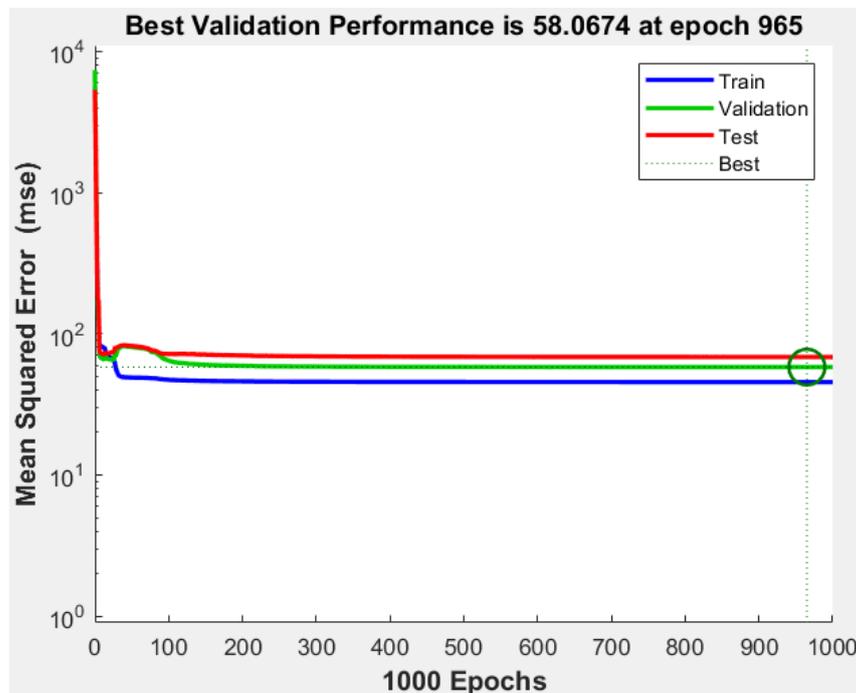
Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la figura 79, mostrada a continuación se observa el reporte del entrenamiento del modelo RNA_FC_C de acuerdo a los parámetros definidos en etapa

de entrenamiento de la RNA para 10 variables de entrada con 4 neuronas en la capa oculta y una variable de salida.

Figura 80:

Performance del modelo de RNA_FC_C con 4 neuronas en la capa oculta.

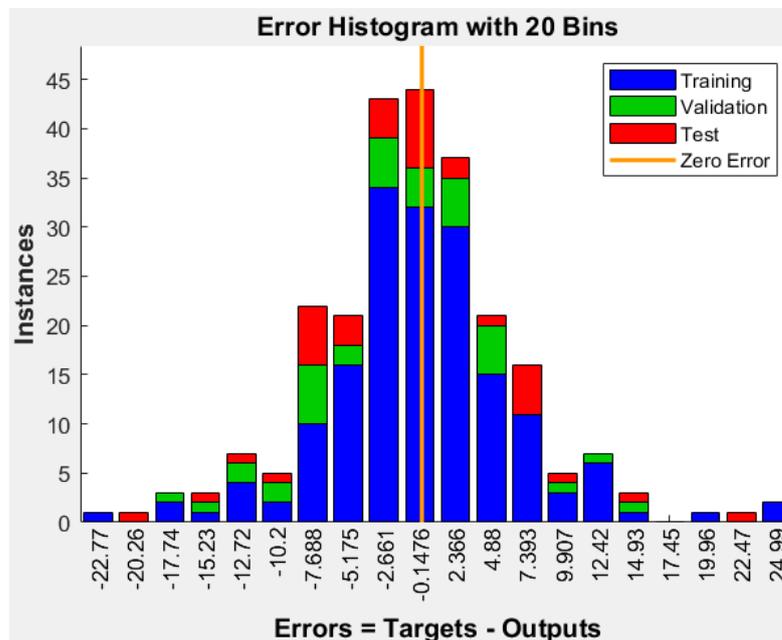


Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la figura 80, se observa el performance del modelo de RNA_FC_C con 4 neuronas en la capa oculta. Donde la mejor época donde se encuentra el mínimo error cuadrático medio MSE es la época 965 de 1000 épocas.

Figura 81:

Histograma del error en el modelo de RNA_FC_C con 4 neuronas en la capa oculta.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la figura 81, se muestra el histograma de errores observándose que la concentración de los errores tanto en el entrenamiento, validación y test; se encuentra en el cero lo cual nos asegura una buena predicción del a resistencia la compresión del concreto f'c.

4.4.1.3.1.1 Extracción de los pesos de las capas del modelo RNA_FC_C.

Tabla 115:

Pesos W1 respecto a 10 variables de entrada y 4 neuronas en la capa oculta.

Pesos W1									
-2.7	1.8	3.0	-1.8	-1.6	-0.1	0.8	-0.2	-0.7	-0.2
1.1	-0.6	-0.7	0.1	-0.1	-0.3	0.8	-0.6	-0.5	-0.8
-9.7	7.1	15.4	-6.9	-2.8	-4.8	-1.5	1.3	2.5	-0.1
-7.4	3.2	6.3	-6.9	-2.8	-0.6	0.7	-2.3	0.7	-0.1

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la tabla 115, se muestra el resultado de los pesos W1 respecto a las 10 variables de entrada con las 4 neuronas en la capa oculta.

Tabla 116:

Pesos W2 respecto a las 4 neuronas en la capa oculta y la variable de salida.

Peso W2
6.6 -1.2 0.3 -4.2

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la tabla 116, se muestra el resultado de los pesos W2 respecto a las 4 neuronas en la capa oculta y la variable de salida.

4.4.1.4 Resultados de modelo RNA_FC_D para 8 variables de entrada.

Tabla 117:

Resultado del cálculo del MSE correspondiente al número de neuronas para el modelo RNA_FC_D.

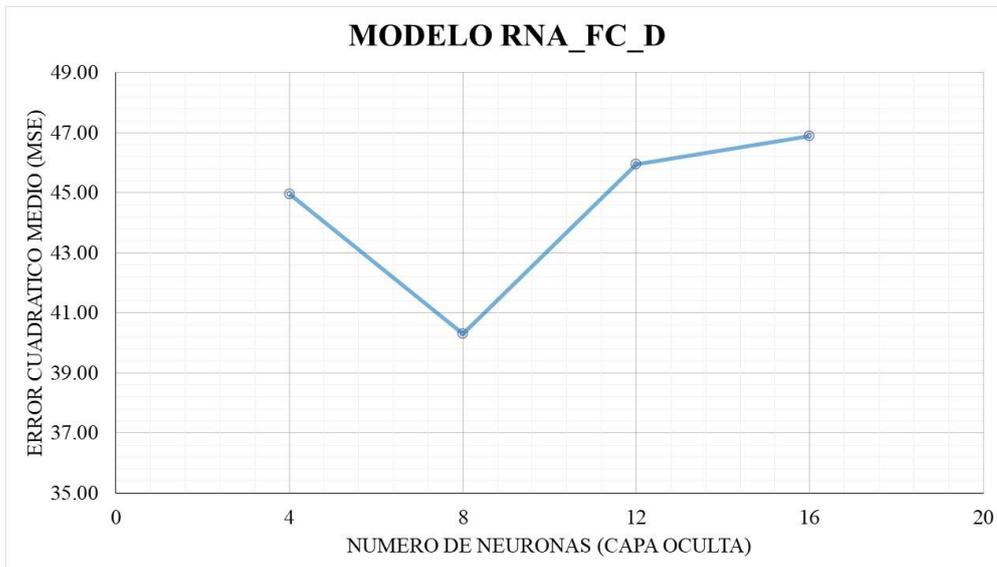
Modelo RNA_FC_D	
Numero de Neuronas	Error Cuadrático Medio (MSE)
4	44.95
8	40.31
12	45.94
16	46.88

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la Tabla 117, se observa el resultado del error cuadrático medio MSE respecto al número de neuronas en la capa oculta para el modelo RNA_FC_D. Donde el valor menor de error cuadrático medio MSE es de 40.31 correspondiente a 8 neuronas en la capa oculta, el cual será utilizado seleccionado para su evaluación.

Figura 82:

Gráfico número de neuronas vs error cuadrático medio MSE, modelo RNA_FC_D.



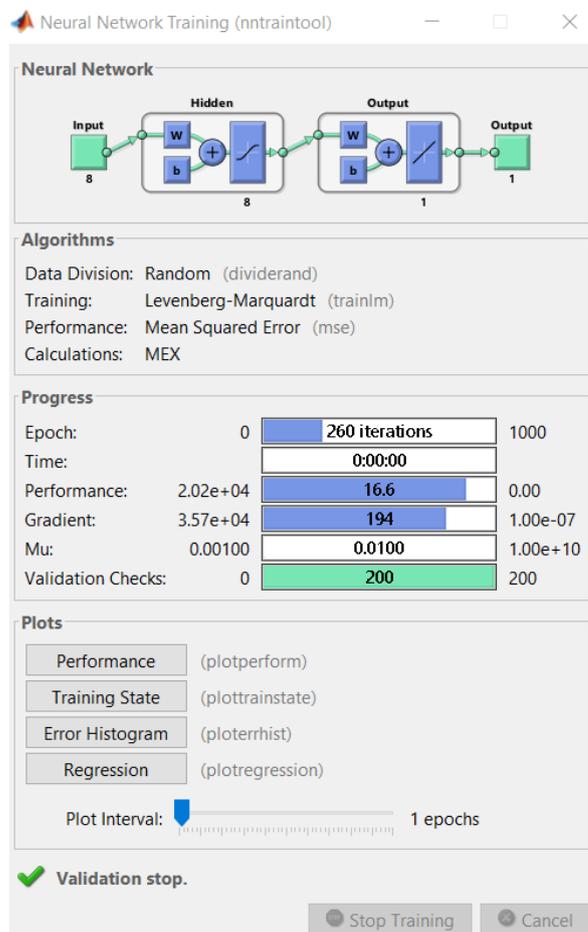
Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la figura 82, se observa la gráfica del número de neuronas vs el error cuadrático medio MSE para un modelo RNA_FC_D. Donde se seleccionó como RNA que tiene un menor error cuadrático medio MSE el cual corresponde 8 neuronas en la capa oculta.

4.4.1.4.1 Resultados del modelo RNA_FC_D con 8 neuronas en la capa oculta.

Figura 83:

Modelo de RNA_FC_D con 8 neuronas en la capa oculta.

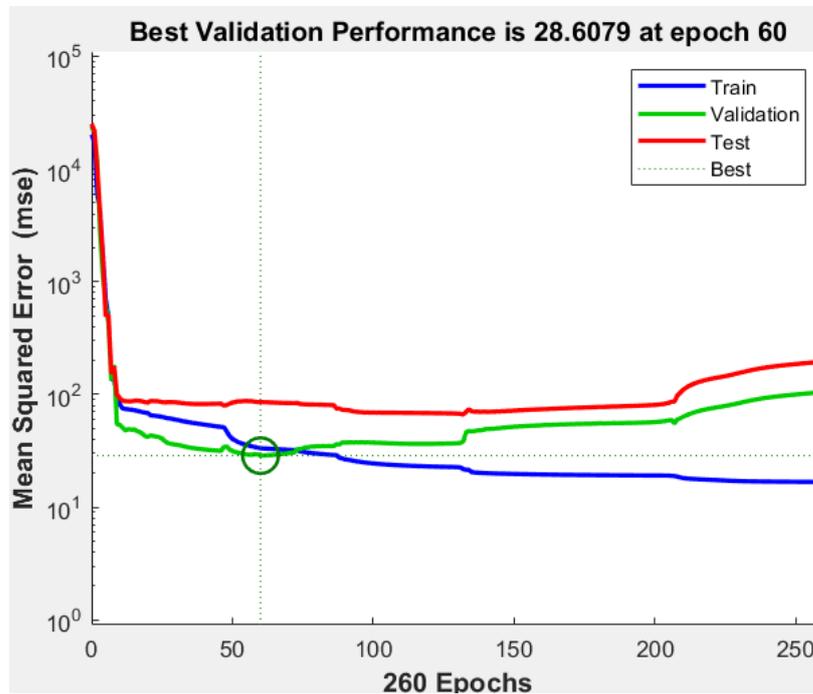


Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la figura 83, mostrada a continuación se observa el reporte del entrenamiento del modelo RNA_FC_D de acuerdo a los parámetros definidos en etapa de entrenamiento de la RNA para 8 variables de entrada con 8 neuronas en la capa oculta y una variable de salida.

Figura 84:

Performance del modelo de RNA_FC_D con 8 neuronas en la capa oculta.

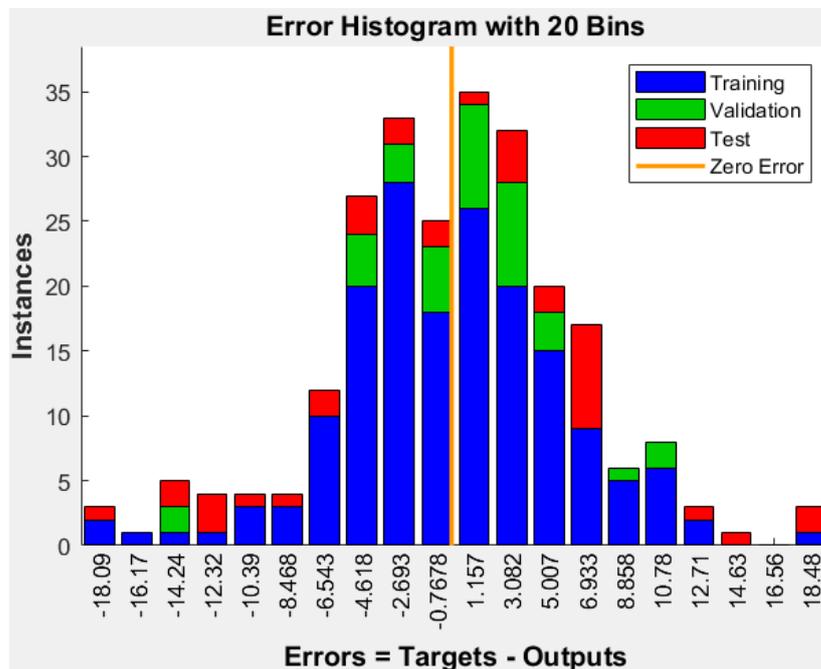


Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la figura 84, se observa el performance del modelo de RNA_FC_D con 8 neuronas en la capa oculta. Donde la mejor época donde se encuentra el mínimo error cuadrático medio MSE es la época 60 de 260 épocas.

Figura 85:

Histograma del error en el modelo de RNA_FC_D con 8 neuronas en la capa oculta.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la figura 85, se muestra el histograma de errores observándose que la concentración de los errores tanto en el entrenamiento, validación y test; se encuentra en el cero lo cual nos asegura una buena predicción del a resistencia la compresión del concreto f'c.

4.4.1.4.1.1 Extracción de los pesos de las capas del modelo RNA_FC_D.

Tabla 118:

Pesos W1 respecto a 8 variables de entrada y 8 neuronas en la capa oculta.

Pesos W1							
2.2	-1.5	-3.6	2.6	1.4	3.0	2.4	-0.1
1.3	-1.9	6.0	2.3	-6.1	-1.9	-1.0	-0.6
4.2	-3.3	-5.3	2.7	0.0	-0.6	0.7	0.0
-2.0	-0.7	0.3	-1.2	-2.0	1.6	2.8	-2.1
-1.1	0.4	-1.0	0.3	2.7	3.9	2.7	-2.2
-4.1	3.4	5.4	-3.0	-0.1	-1.2	-0.1	-0.1
-2.1	0.4	0.7	-1.1	0.8	-0.9	-2.5	4.5
-4.3	3.0	5.9	-3.5	-0.2	0.0	-0.6	-1.4

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la tabla 118, se muestra el resultado de los pesos W1 respecto a las 8 variables de entrada con las 8 neuronas en la capa oculta.

Tabla 119:

Pesos W2 respecto a las 8 neuronas en la capa oculta y la variable de salida.

Peso W2							
-1.1	0.2	-3.2	0.6	0.3	-6.8	-0.4	-0.8

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la tabla 119, se muestra el resultado de los pesos W2 respecto a las 8 neuronas en la capa oculta y la variable de salida.

4.4.2 Resultado de los modelos de RNA para trabajabilidad del concreto.

4.4.2.1 Resultados de modelo RNA_S_A para 12 variables de entrada.

Tabla 120:

Resultado del cálculo del MSE correspondiente al número de neuronas para el modelo RNA_S_A.

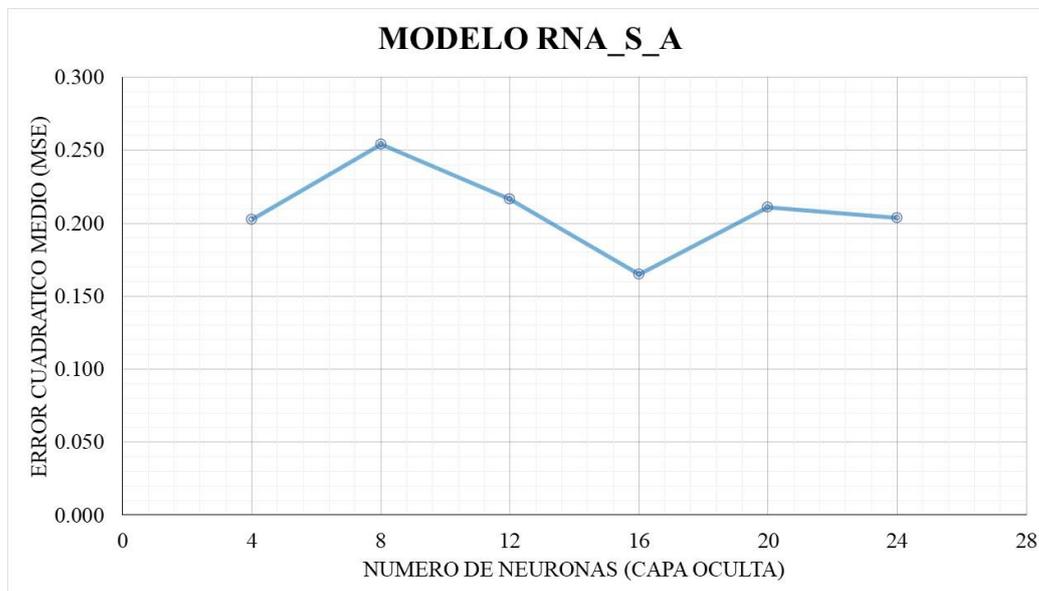
Modelo RNA_S_A	
Numero de Neuronas	Error Cuadrático Medio (MSE)
4	0.202
8	0.254
12	0.217
16	0.165
20	0.211
24	0.204

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la Tabla 120, se observa el resultado del error cuadrático medio MSE respecto al número de neuronas en la capa oculta para el modelo RNA_S_A. Donde el valor menor de error cuadrático medio MSE es de 0.165 correspondiente a 16 neuronas en la capa oculta, el cual será utilizado seleccionado para su evaluación.

Figura 86:

Gráfico número de neuronas vs error cuadrático medio MSE, modelo RNA_S_A.



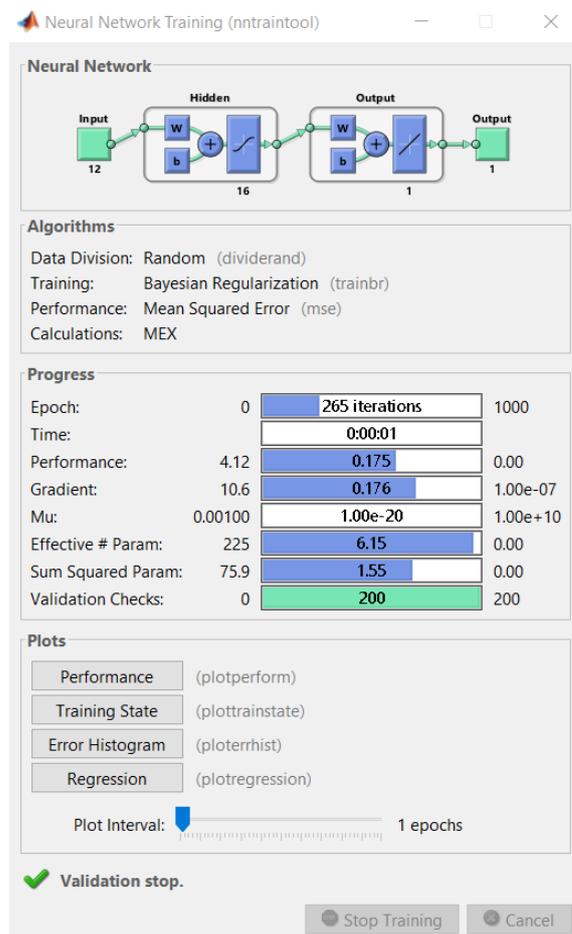
Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la figura 86, se observa la gráfica del número de neuronas vs el error cuadrático medio MSE para un modelo RNA_S_A. Donde se seleccionó como RNA que tiene un menor error cuadrático medio MSE el cual corresponde 16 neuronas en la capa oculta.

4.4.2.1.1 Resultados del modelo RNA_S_A con 16 neuronas en la capa oculta.

Figura 87:

Modelo de RNA_S_A con 16 neuronas en la capa oculta.

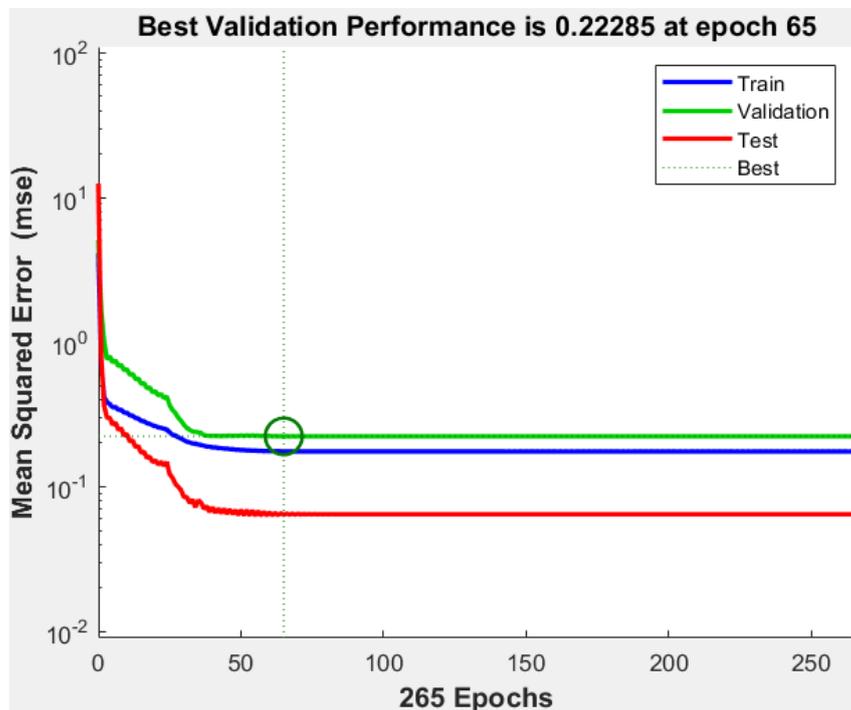


Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la figura 87, mostrada a continuación se observa el reporte del entrenamiento del modelo RNA_S_A de acuerdo a los parámetros definidos en etapa de entrenamiento de la RNA para 12 variables de entrada con 16 neuronas en la capa oculta y una variable de salida.

Figura 88:

Performance del modelo de RNA_S_A con 16 neuronas en la capa oculta.

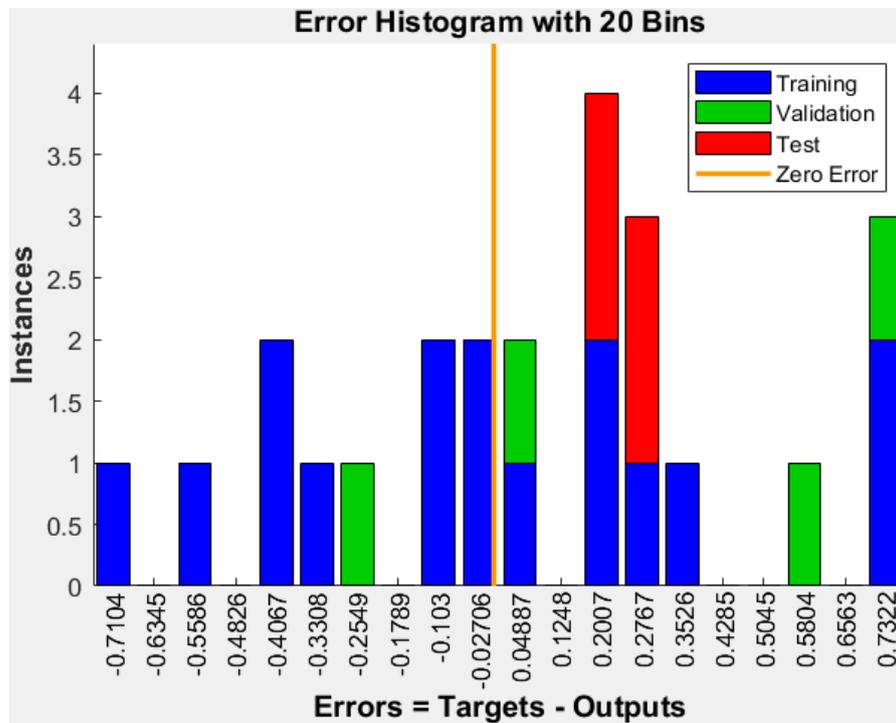


Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la figura 88, se observa el performance del modelo de RNA_S_A con 16 neuronas en la capa oculta. Donde la mejora época donde se encuentra el mínimo error cuadrático medio MSE es la época 65 de 265 épocas.

Figura 89:

Histograma del error en el modelo de RNA_S_A con 16 neuronas en la capa oculta.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la figura 89, se muestra el histograma de errores observándose que la concentración de los errores tanto en el entrenamiento, validación y test; no se encuentra concentradas en el cero lo cual no asegura una buena predicción de la trabajabilidad del concreto.

4.4.2.1.1.1 Extracción de los pesos de las capas del modelo RNA_S_A.

Tabla 121:

Pesos W1 respecto a 12 variables de entrada con 16 neuronas en la capa oculta.

Peso W1											
-0.0030	0.0068	-0.0012	0.0013	0.0014	0.0011	0.0013	-0.0118	-0.0013	0.0007	0.0010	0.0020
0.0093	-0.0208	0.0036	-0.0041	-0.0042	-0.0034	-0.0041	0.0361	0.0041	-0.0021	-0.0029	-0.0062
0.0083	-0.0185	0.0032	-0.0036	-0.0038	-0.0030	-0.0036	0.0322	0.0037	-0.0019	-0.0026	-0.0055
-0.0013	0.0029	-0.0005	0.0006	0.0006	0.0005	0.0006	-0.0050	-0.0006	0.0003	0.0004	0.0009
0.0143	-0.0316	0.0054	-0.0062	-0.0065	-0.0052	-0.0063	0.0551	0.0063	-0.0032	-0.0044	-0.0094
0.0040	-0.0090	0.0016	-0.0017	-0.0018	-0.0015	-0.0018	0.0157	0.0018	-0.0009	-0.0013	-0.0027
-0.0014	0.0032	-0.0006	0.0006	0.0006	0.0005	0.0006	-0.0056	-0.0006	0.0003	0.0005	0.0009
-0.0106	0.0236	-0.0041	0.0046	0.0048	0.0039	0.0047	-0.0410	-0.0047	0.0024	0.0033	0.0070
-0.0067	0.0149	-0.0026	0.0029	0.0030	0.0024	0.0029	-0.0258	-0.0029	0.0015	0.0021	0.0044
0.0319	0.1220	0.1086	0.3037	0.2807	0.2720	0.3053	-0.4890	-0.3089	-0.1446	0.0604	-0.0593
0.0045	-0.0100	0.0018	-0.0019	-0.0020	-0.0016	-0.0020	0.0174	0.0020	-0.0010	-0.0014	-0.0030
0.0063	-0.0141	0.0025	-0.0027	-0.0028	-0.0023	-0.0027	0.0244	0.0028	-0.0014	-0.0020	-0.0042
-0.0046	0.0103	-0.0018	0.0020	0.0021	0.0017	0.0020	-0.0179	-0.0020	0.0010	0.0015	0.0031
0.0036	-0.0081	0.0014	-0.0016	-0.0016	-0.0013	-0.0016	0.0140	0.0016	-0.0008	-0.0012	-0.0024
-0.0007	0.0015	-0.0003	0.0003	0.0003	0.0002	0.0003	-0.0027	-0.0003	0.0002	0.0002	0.0005
-0.0028	0.0062	-0.0011	0.0012	0.0012	0.0010	0.0012	-0.0107	-0.0012	0.0006	0.0009	0.0018

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la tabla 121, se muestra el resultado de los pesos W1 respecto a las 12 variables de entrada con las 16 neuronas en la capa oculta.

Tabla 122:

Pesos W2 respecto a las 16 neuronas en la capa oculta y la variable de salida.

Peso W2															
0.015	-0.046	-0.041	0.006	-0.070	-0.020	0.007	0.052	0.033	0.826	-0.022	-0.031	0.023	-0.018	0.003	0.014

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la tabla 122, se muestra el resultado de los pesos W2 respecto a las 16 neuronas en la capa oculta y la variable de salida.

4.4.2.2 Resultados de modelo RNA_S_B para 9 variables de entrada.

Tabla 123:

Resultado del cálculo del MSE correspondiente al número de neuronas para el modelo RNA_S_B.

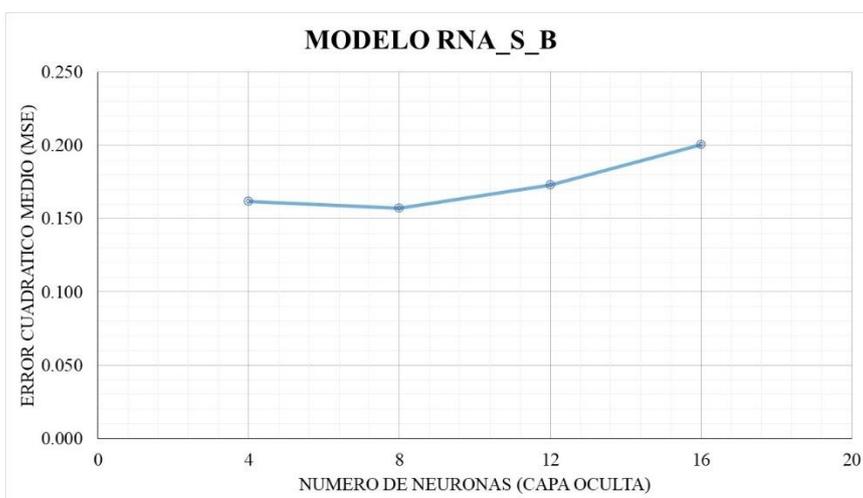
Modelo RNA_S_B	
Numero de Neuronas	Error Cuadrático Medio (MSE)
4	0.162
8	0.157
12	0.173
16	0.201

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la Tabla 123, se observa el resultado del error cuadrático medio MSE respecto al número de neuronas en la capa oculta para el modelo RNA_S_B. Donde el valor menor de error cuadrático medio MSE es de 0.157 correspondiente a 8 neuronas en la capa oculta, el cual será utilizado seleccionado para su evaluación.

Figura 90:

Gráfico número de neuronas vs error cuadrático medio MSE, modelo RNA_S_B.



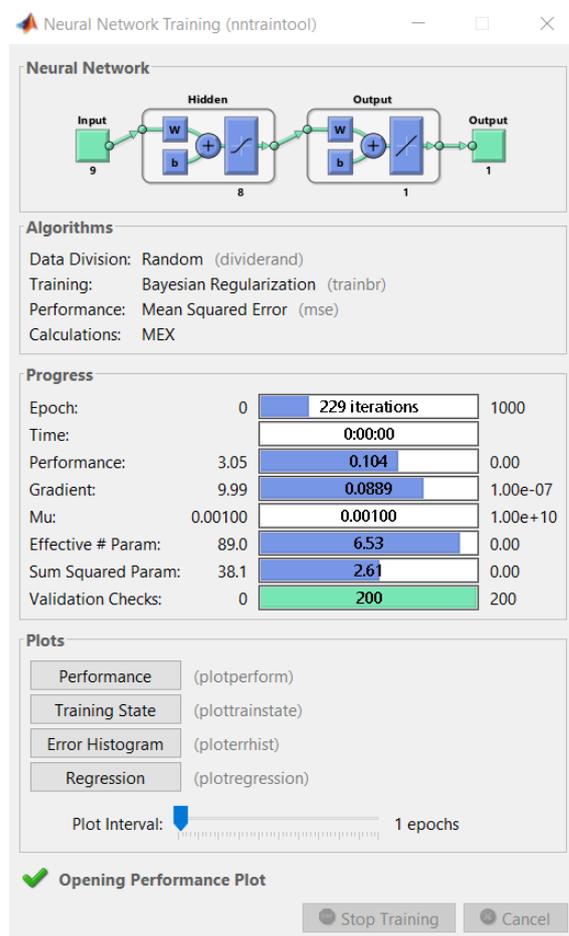
Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la figura 90, se observa la gráfica del número de neuronas vs el error cuadrático medio MSE para un modelo RNA_S_B. Donde se seleccionó como RNA que tiene un menor error cuadrático medio MSE el cual corresponde 8 neuronas en la capa oculta.

4.4.2.2.1 Resultados del modelo RNA_S_B con 8 neuronas en la capa oculta.

Figura 91:

Modelo de RNA_S_B con 8 neuronas en la capa oculta.

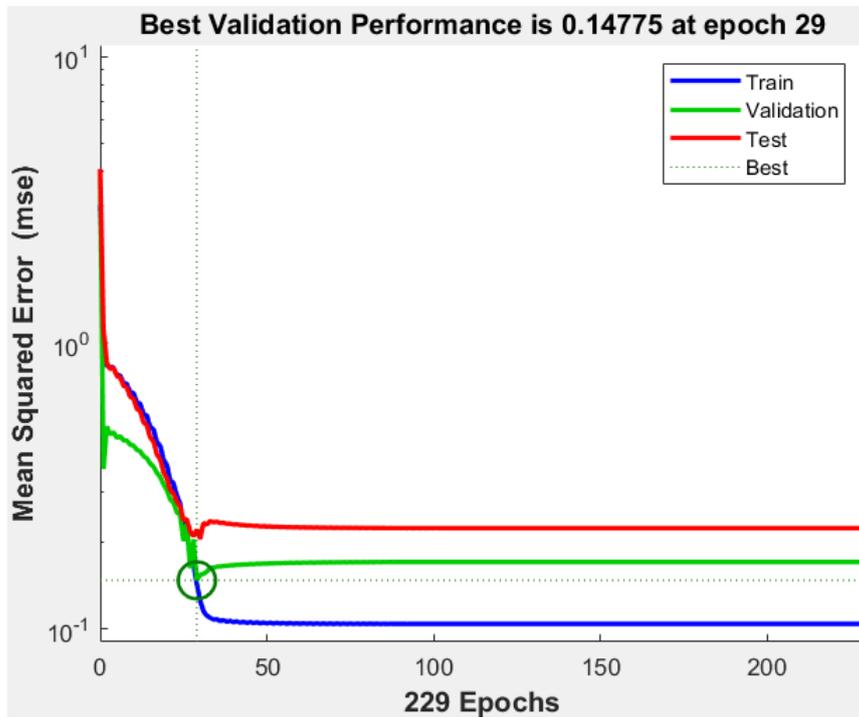


Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la figura 91, mostrada a continuación se observa el reporte del entrenamiento del modelo RNA_S_B de acuerdo a los parámetros definidos en etapa de entrenamiento de la RNA para 9 variables de entrada con 8 neuronas en la capa oculta y una variable de salida.

Figura 92:

Performance del modelo de RNA_S_B con 8 neuronas en la capa oculta.

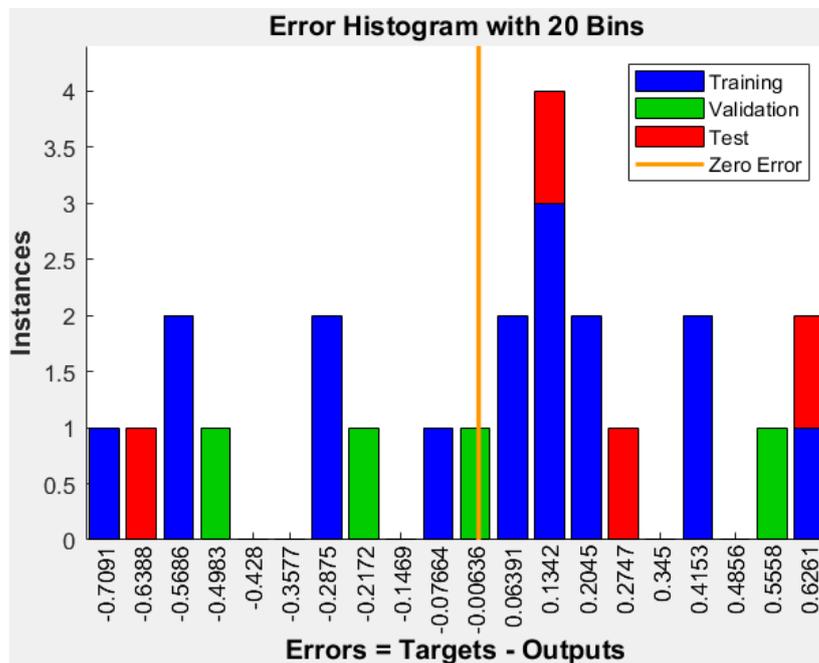


Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la figura 92, se observa el performance del modelo de RNA_S_B con 8 neuronas en la capa oculta. Donde la mejora época donde se encuentra el mínimo error cuadrático medio MSE es la época 29 de 229 épocas.

Figura 93:

Histograma del error en el modelo de RNA_S_B con 8 neuronas en la capa oculta.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la figura 93, se muestra el histograma de errores observándose que la concentración de los errores tanto en el entrenamiento, validación y test; no se encuentra concentradas en el cero lo cual no asegura una buena predicción de la trabajabilidad del concreto.

4.4.2.2.1.1 Extracción de los pesos de las capas del modelo RNA_S_B.

Tabla 124:

Pesos W1 respecto a 9 variables de entrada con 8 neuronas en la capa oculta.

Pesos W1								
0.013	-0.007	0.027	0.013	0.083	-0.014	0.054	0.064	0.007
0.012	-0.007	0.026	0.012	0.082	-0.013	0.053	0.063	0.007
0.010	-0.005	0.021	0.010	0.065	-0.011	0.042	0.050	0.005
-0.011	0.003	-0.021	-0.011	-0.059	0.012	-0.040	-0.048	-0.005
0.007	-0.003	0.014	0.007	0.042	-0.007	0.028	0.033	0.003
0.015	-0.009	0.032	0.015	0.101	-0.016	0.065	0.077	0.008
-0.371	-0.451	-0.246	-0.376	0.354	0.381	0.203	-0.051	-0.007
0.003	-0.002	0.005	0.003	0.017	-0.003	0.011	0.013	0.001

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la tabla 124 se muestra el resultado de los pesos W1 respecto a las 9 variables de entrada con las 8 neuronas en la capa oculta.

Tabla 125:

Pesos W2 respecto a las 8 neuronas en la capa oculta y la variable de salida.

Peso W2							
-0.06	-0.01	-0.06	0.137	-0.09	-0.04	-0.89	-0.02

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la tabla 125 se muestra el resultado de los pesos W2 respecto a las 8 neuronas en la capa oculta y la variable de salida.

4.4.2.3 Resultados de modelo RNA_S_C para 6 variables de entrada.

Tabla 126:

Resultado del cálculo del MSE correspondiente al número de neuronas para el modelo RNA_S_C.

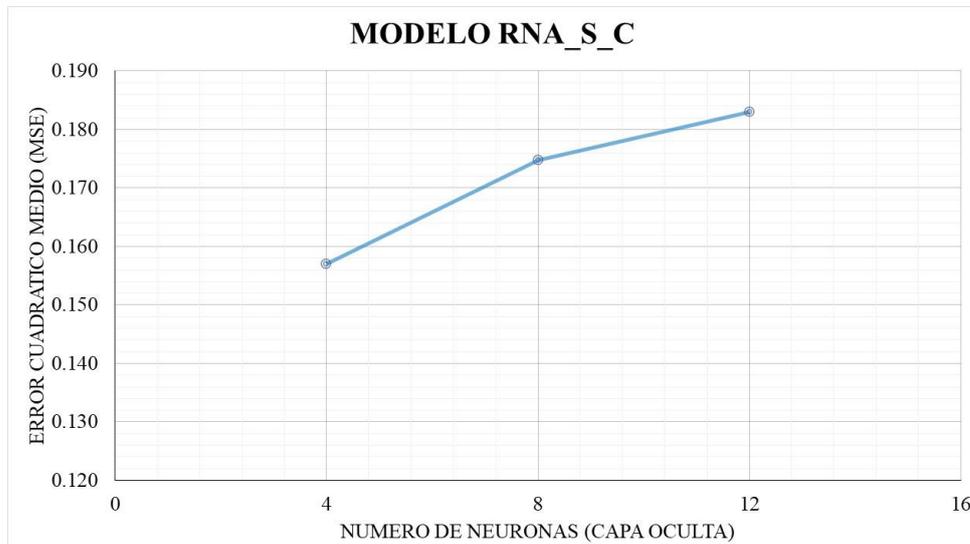
Modelo RNA_S_C	
Numero de Neuronas	Error Cuadrático Medio (MSE)
4	0.157
8	0.175
12	0.183

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la Tabla 126, se observa el resultado del error cuadrático medio MSE respecto al número de neuronas en la capa oculta para el modelo RNA_S_C. Donde el valor menor de error cuadrático medio MSE es de 0.157 correspondiente a 4 neuronas en la capa oculta, el cual será utilizado seleccionado para su evaluación.

Figura 94:

Gráfico número de neuronas vs error cuadrático medio MSE, modelo RNA_S_C.



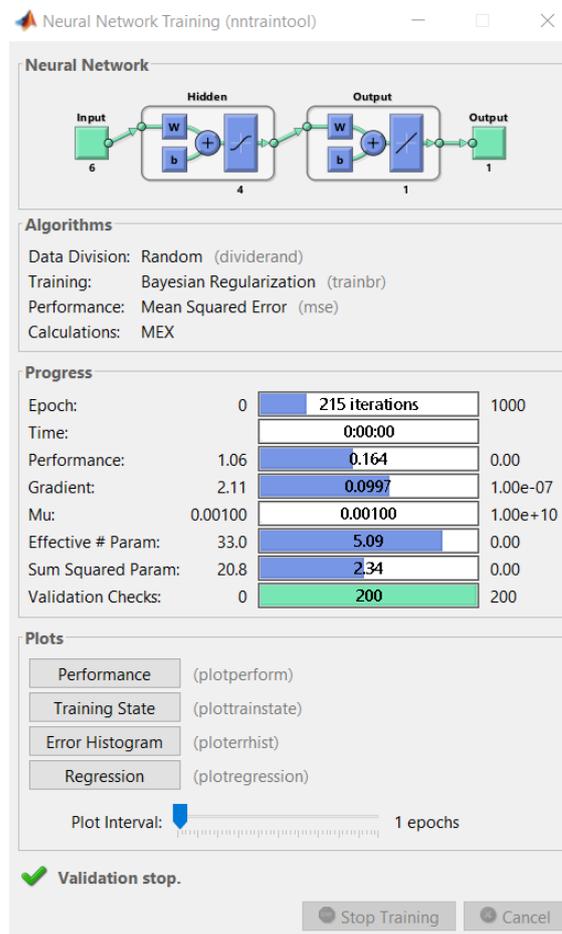
Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la figura 94, se observa la gráfica del número de neuronas vs el error cuadrático medio MSE para un modelo RNA_S_C. Donde se seleccionó como RNA que tiene un menor error cuadrático medio MSE el cual corresponde 4 neuronas en la capa oculta.

4.4.2.3.1 Resultados del modelo RNA_S_C con 4 neuronas en la capa oculta.

Figura 95:

Modelo de RNA_S_C con 4 neuronas en la capa oculta.

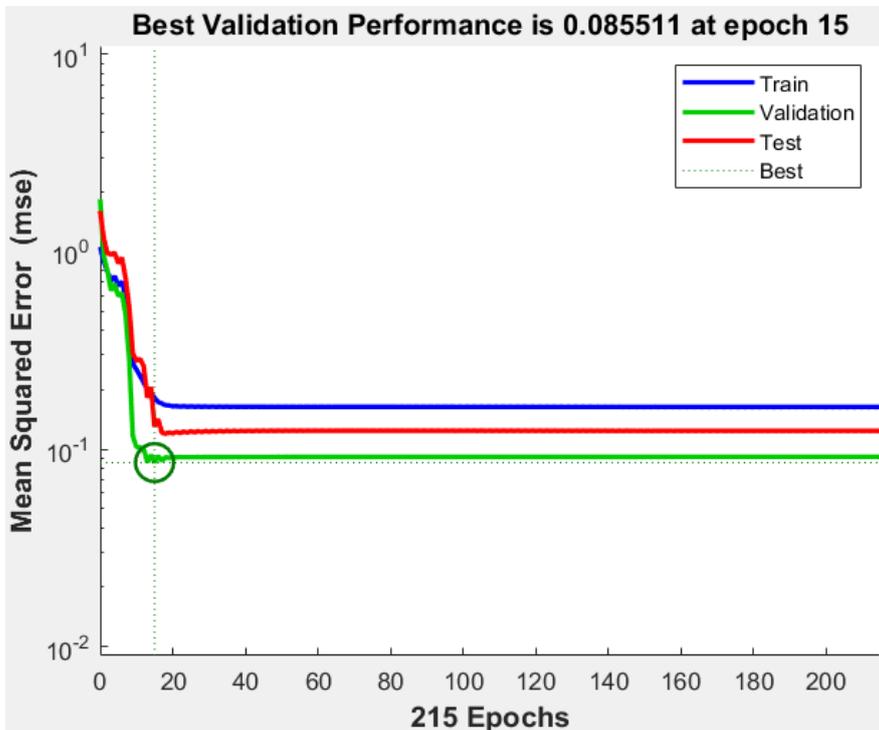


Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la figura 95, mostrada a continuación se observa el reporte del entrenamiento del modelo RNA_S_C de acuerdo a los parámetros definidos en etapa de entrenamiento de la RNA para 6 variables de entrada con 4 neuronas en la capa oculta y una variable de salida.

Figura 96:

Performance del modelo de RNA_S_C con 4 neuronas en la capa oculta.

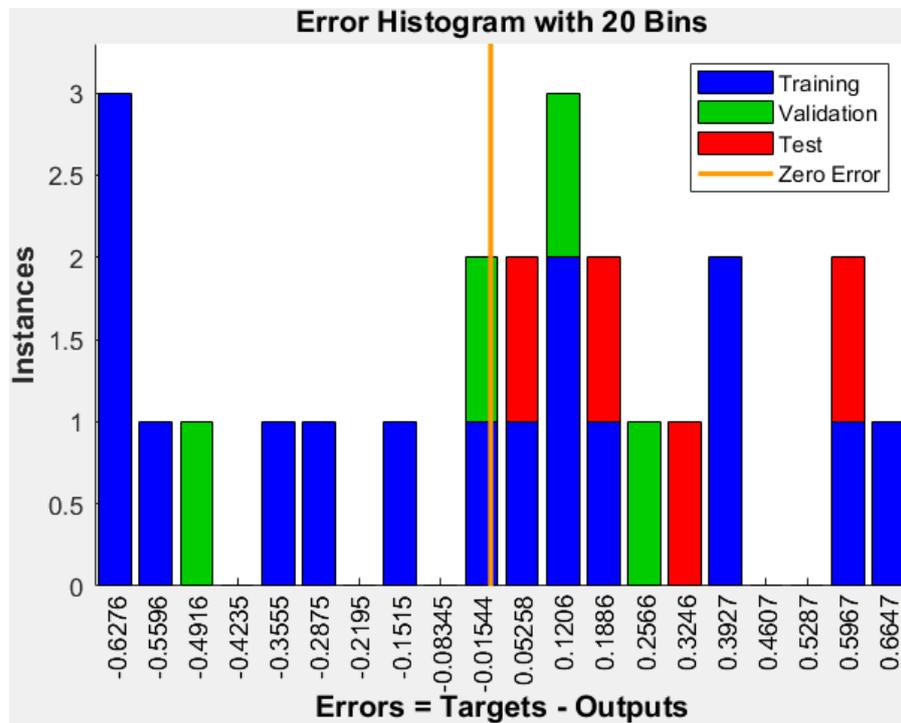


Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la figura 96, se observa el performance del modelo de RNA_S_C con 4 neuronas en la capa oculta. Donde la mejora época donde se encuentra el mínimo error cuadrático medio MSE es la época 15 de 215 épocas.

Figura 97:

Histograma del error en el modelo de RNA_S_C con 4 neuronas en la capa oculta.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la figura 97, se muestra el histograma de errores observándose que la concentración de los errores tanto en el entrenamiento, validación y test; no se encuentra concentradas en el cero lo cual no asegura una buena predicción de la trabajabilidad del concreto.

4.4.2.3.1.1 Extracción de los pesos de las capas del modelo RNA_S_C.

Tabla 127:

Pesos W1 respecto a 6 variables de entrada con 4 neuronas en la capa oculta.

Pesos W1					
0.0007	-0.0003	0.0014	0.0007	0.0042	0.0015
0.4558	0.5155	0.3238	0.4599	-0.3527	-0.1258
-0.0127	0.0461	-0.0599	-0.0119	-0.2600	-0.1148
-0.0194	0.0074	-0.0393	-0.0191	-0.1177	-0.0417

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la tabla 127 se muestra el resultado de los pesos W1 respecto a las 6 variables de entrada con las 4 neuronas en la capa oculta.

Tabla 128:

Pesos W2 respecto a las 4 neuronas en la capa oculta y la variable de salida.

Peso W2			
-0.0045	0.8990	0.2436	0.1268

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Interpretación: En la tabla 128 se muestra el resultado de los pesos W2 respecto a las 4 neuronas en la capa oculta y la variable de salida.

4.5 ANÁLISIS DE COSTOS Y TIEMPOS

Como se vio a lo largo del desarrollo de este proyecto se sabe que para diseñar un concreto ligero con sustitución de esferas de poliestireno expandido modificado (MEPS) para un diseño de 210 kg/cm², se realizaron distintos experimentos los cuales sustituyen MEPS por concreto en distintos porcentajes, realizando probetas y su posterior ensayo de resistencia a compresión; dicho ensayo se realiza tras un periodo de curado (28 días) esto hace que los resultados disten de ser inmediatos a la fabricación del producto.

Por lo tanto, a fin de evitar el tiempo de espera y obtener los resultados de forma inmediata el proyecto propone modelos de redes neuronales artificiales optimizando así tiempos y costos.

En el presente proyecto, para la realización del análisis de costos y tiempos se tomó como muestra los 27 registros de los diseños utilizados para la prueba de la red neuronal los cuales detallan en EL ANEXO 03.

A continuación, se detalla la comparación entre el análisis de precio real para la obtención de la resistencia a compresión incluyendo los respectivos ensayos de materiales y diseño vs el análisis de precio usando redes neuronales artificiales para la realización de estos 27 registros:

ANÁLISIS DE COSTOS					
ENSAYOS TESIS CONCRETO - MÉTODO TRADICIONAL					
Item	Descripción	Unidad	Cantidad	C.U	Parcial
1	Contenido de humedad	Und.	2	7.50	15.00
2	Granulometría	Und.	2	40.00	80.00
3	Peso unitario suelto y compactado	Und.	2	55.00	110.00
4	Peso unitario suelto y compactado	Und.	3	80.00	240.00
5	Compresión simple	Und.	27	18.00	486.00
6	Diseño de mezcla	Und.	3	320.00	960.00
TOTAL					1891.00

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 129, se muestra el resultado del análisis de costos real para la obtención de la resistencia a compresión incluyendo sus respectivos ensayos de materiales, obteniendo un total de 1891 soles.

Tabla 129:

Análisis de costos para ensayos de concreto-método redes neuronales artificiales.

ANÁLISIS DE COSTOS					
ENSAYOS TESIS CONCRETO - USANDO RED NEURONAL PROPUESTA					
Item	Descripción	Unidad	Cantidad	C.U	Parcial
1	Contenido de humedad	Und.	2	7.50	15.00
3	Peso unitario suelto y compactado	Und.	2	55.00	110.00
4	Peso unitario suelto y compactado	Und.	3	80.00	240.00
5	Compresión simple	Und.	0	18.00	0.00
6	Diseño de mezcla	Und.	3	320.00	960.00
TOTAL					1405.00

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 130, se muestra el análisis de costos real para la obtención de la resistencia a compresión incluyendo sus respectivos ensayos de materiales, utilizando RNA para la predicción de la resistencia a compresión ahorrándonos en precio de rotura, obteniendo un total de 1405 soles.

A continuación, se detalla la comparación entre el análisis del tiempo real para la obtención de la resistencia a compresión incluyendo los respectivos tiempos de curado (7, 14, 28 días) vs el análisis de tiempos usando redes neuronales artificiales para la realización de estos 27 los cuales se detallan a continuación:

Tabla 130:

Análisis de tiempos.

ANÁLISIS DE TIEMPOS				
Tiempo de rotura para F'c - Método Tradicional				Tiempo de rotura para F'c - Método R.N.A
Descripción	Fecha de moldeo	Fecha de rotura	Duración Dias	Tiempo desarrollo (min)
ACI MEPS T110 15% - 1	08/09/2021	15/09/2021	7	10
ACI MEPS T110 15% - 2	08/09/2021	15/09/2021	7	10
ACI MEPS T110 15% - 3	08/09/2021	15/09/2021	7	10
ACI MEPS T110 15% - 4	08/09/2021	22/09/2021	14	10
ACI MEPS T110 15% - 5	08/09/2021	22/09/2021	14	10
ACI MEPS T110 15% - 6	08/09/2021	22/09/2021	14	10
ACI MEPS T110 15% - 7	08/09/2021	06/10/2021	28	10
ACI MEPS T110 15% - 8	08/09/2021	06/10/2021	28	10
ACI MEPS T110 15% - 9	08/09/2021	06/10/2021	28	10
MF MEPS T130 5% - 1	11/09/2021	18/09/2021	7	10
MF MEPS T130 5% - 2	11/09/2021	18/09/2021	7	10
MF MEPS T130 5% - 3	11/09/2021	18/09/2021	7	10
MF MEPS T130 5% - 4	11/09/2021	25/09/2021	14	10
MF MEPS T130 5% - 5	11/09/2021	25/09/2021	14	10
MF MEPS T130 5% - 6	11/09/2021	25/09/2021	14	10
MF MEPS T130 5% - 7	11/09/2021	09/10/2021	28	10
MF MEPS T130 5% - 8	11/09/2021	09/10/2021	28	10
MF MEPS T130 5% - 9	11/09/2021	09/10/2021	28	10
W MEPS T145 10% - 1	13/09/2021	20/09/2021	7	10
W MEPS T145 10% - 2	13/09/2021	20/09/2021	7	10
W MEPS T145 10% - 3	13/09/2021	20/09/2021	7	10
W MEPS T145 10% - 4	13/09/2021	27/09/2021	14	10
W MEPS T145 10% - 5	13/09/2021	27/09/2021	14	10
W MEPS T145 10% - 6	13/09/2021	27/09/2021	14	10
W MEPS T145 10% - 7	13/09/2021	11/10/2021	28	10
W MEPS T145 10% - 8	13/09/2021	11/10/2021	28	10
W MEPS T145 10% - 9	13/09/2021	11/10/2021	28	10

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la tabla 131, se muestra el análisis de tiempos utilizando el método tradicional de roturas transcurrido el curado de concreto respecto a la predicción obtenida por la



RNA, de los cuales se observó un resultado inmediato mediante el uso de RNA respecto al método tradicional que se tiene que esperar el tiempo de curado.

Es decir, la determinación de la $F'c$ a compresión del concreto ligero MEPS usando redes neurales artificiales permite el ahorro de materiales además que la obtención de dicha resistencia es de manera inmediata.

4.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

4.6.1 Análisis estadístico del coeficiente de determinación y coeficiente de correlación de PEARSON.

Para medir la capacidad predictiva de los modelos en las redes neuronales artificiales se utilizó el coeficiente de determinación R^2 siendo el más adecuado el que tenga aproximación cercana a 1.

Para el análisis de asociación entre dos variables se utilizó la correlación lineal de PEARSON donde se interpretó el grado de relación entre dos variables cuantitativas de acuerdo al valor calculado r .

- Correlación inexistente con (r) igual a cero
- Correlación muy reducida con valores (r) comprendidos iguales a 0.01 y menores que 0.20.
- Correlación baja con valores (r) comprendidos iguales a 0.21 y menores de 0.40.
- Correlación medida con valores (r) comprendidos igual a 0.41 y menores de 0.60.
- Correlación alta con valores (r) comprendidos iguales a 0.61 y menores de 0.80.
- Correlación muy alta con valores (r) comprendidos iguales a 0.81 y menores de 0.99.

- Correlación perfecta con valor de (r) igual a 1

4.6.2 Análisis estadístico de los modelos de RNA para la predicción de la resistencia a la compresión del concreto $f'c$.

4.6.2.1 Análisis estadístico de los modelos de RNA por el número de neuronas en capa oculta.

Para poder probar los modelos de RNA_FC_A, RNA_FC_B, RNA_FC_C y RNA_FC_D, se utilizó los indicadores estadísticos que son el coeficiente de determinación (R^2) y el coeficiente de correlación de PEARSON (r). Los cuales evaluaron el comportamiento de los valores predichos por los cuatro modelos de RNA respecto al valor real de la resistencia a la compresión del concreto $f'c$.

4.6.2.1.1 Análisis estadístico del modelo RNA_FC_A.

4.6.2.1.1.1 Análisis del modelo con 4 neuronas en la capa oculta.

Tabla 131:

Análisis estadístico para cálculo del coeficiente de determinación y coeficiente de correlación para un modelo RNA_FC_A con 4 neuronas en la capa oculta.

Red Neuronal Artificial RNA_Fc_A con 4 neuronas en capa oculta								
N°	Descripción	f'c Real	f'c	$(Y - \hat{Y})$	$(Y - \hat{Y})^2$	$Y - \bar{Y}$	$(Y - \bar{Y})^2$	
		(kg/cm ²)	Predicción					
		Y	\hat{Y}					
1	ACI MEPS T110 15% - 1	149.05	162.02	-12.97	168.32	-44.53	1982.85	
2	ACI MEPS T110 15% - 2	139.88	162.02	-22.15	490.44	-53.70	2883.80	
3	ACI MEPS T110 15% - 3	143.97	162.02	-18.06	326.02	-49.61	2461.29	
4	ACI MEPS T110 15% - 4	195.62	199.25	-3.63	13.19	2.04	4.16	
5	ACI MEPS T110 15% - 5	206.80	199.25	7.55	56.99	13.22	174.77	



6	ACI MEPS T110 15% - 6	201.16	199.25	1.91	3.65	7.58	57.48
7	ACI MEPS T110 15% - 7	217.42	233.96	-16.54	273.53	23.84	568.19
8	ACI MEPS T110 15% - 8	225.27	233.96	-8.68	75.36	31.69	1004.55
9	ACI MEPS T110 15% - 9	221.99	233.96	-11.96	143.15	28.41	807.19
10	MF MEPS T130 5% - 1	163.72	177.65	-13.93	194.06	-29.86	891.61
11	MF MEPS T130 5% - 2	167.14	177.65	-10.51	110.40	-26.44	698.88
12	MF MEPS T130 5% - 3	167.64	177.65	-10.02	100.30	-25.94	673.11
13	MF MEPS T130 5% - 4	216.60	217.11	-0.51	0.26	23.02	529.95
14	MF MEPS T130 5% - 5	208.35	217.11	-8.77	76.84	14.77	218.03
15	MF MEPS T130 5% - 6	213.19	217.11	-3.93	15.41	19.61	384.37
16	MF MEPS T130 5% - 7	241.33	241.18	0.16	0.02	47.76	2280.57
17	MF MEPS T130 5% - 8	235.39	241.18	-5.78	33.45	41.81	1748.40
18	MF MEPS T130 5% - 9	237.17	241.18	-4.01	16.08	43.59	1899.91
19	W MEPS T145 10% - 1	155.80	151.27	4.53	20.55	-37.78	1427.22
20	W MEPS T145 10% - 2	149.38	151.27	-1.89	3.55	-44.20	1953.40
21	W MEPS T145 10% - 3	154.19	151.27	2.92	8.54	-39.39	1551.49
22	W MEPS T145 10% - 4	182.48	180.90	1.58	2.49	-11.10	123.28
23	W MEPS T145 10% - 5	193.08	180.90	12.18	148.40	-0.50	0.25
24	W MEPS T145 10% - 6	187.90	180.90	7.01	49.10	-5.67	32.20
25	W MEPS T145 10% - 7	213.11	215.53	-2.42	5.88	19.53	381.39
26	W MEPS T145 10% - 8	221.37	215.53	5.84	34.13	27.79	772.55
27	W MEPS T145 10% - 9	217.65	215.53	2.12	4.48	24.07	579.30
SUMATORIA (Σ)					2374.61		26090.20

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Promedio (\bar{Y}) = 193.58

Coefficiente de determinación (R^2)

$$R^2 = 1 - \frac{\Sigma(Y - \hat{Y})^2}{\Sigma(Y - \bar{Y})^2}$$

$$R^2 = 1 - \frac{2374.61}{26090.20}$$

$$R^2 = 0.909$$

Coefficiente de correlación (r)

$$r = \sqrt{R^2}$$

$$r = \sqrt{0.909}$$

$$r = 0.953$$

Resultados de coeficiente de determinación.

Se midió la capacidad de predicción de la resistencia obtenida por el modelo de RNA_Fc_A con 16 variables de entrada, 4 neuronas en la capa oculta vs la resistencia a compresión real del concreto ($f'c$ real). El valor obtenido del coeficiente de determinación es 0.909, esto significa que tiene una capacidad de predicción buena con respecto al valor real.

Resultados de coeficiente correlación de PEARSON.

Para el análisis de relación de la variable de resistencia a la compresión real ($f'c$ real) y la predicción por el modelo RNA_Fc_A con 4 neuronas en la capa oculta. Se determino el valor del coeficiente de correlación de 0.953, esto significa que se encuentra en el rango $0.81=r=0.99$, lo cual nos indica que existe una correlación muy alta entre la resistencia a la compresión real ($f'c$ real) y la predicción por el modelo RNA_Fc_A.

4.6.2.1.2 Análisis estadístico del modelo RNA_FC_B.

4.6.2.1.2.1 Análisis del modelo con 12 neuronas en la capa oculta.

Tabla 132:

Análisis estadístico para cálculo del coeficiente de determinación y coeficiente de correlación para un modelo RNA_FC_B con 12 neuronas en la capa oculta.

Red Neuronal Artificial RNA_Fc_B con 12 neuronas en la capa oculta							
N°	Descripción	f'c Real	f'c	$(Y - \hat{Y})$	$(Y - \hat{Y})^2$	$Y - \bar{Y}$	$(Y - \bar{Y})^2$
		(kg/cm ²)	Predicción (kg/cm ²)				
		Y	\hat{Y}				
1	ACI MEPS T110 15% - 1	149.05	155.61	-6.56	43.08	-44.53	1982.85
2	ACI MEPS T110 15% - 2	139.88	155.61	-15.74	247.61	-53.70	2883.80
3	ACI MEPS T110 15% - 3	143.97	155.61	-11.65	135.63	-49.61	2461.29
4	ACI MEPS T110 15% - 4	195.62	197.86	-2.24	5.03	2.04	4.16
5	ACI MEPS T110 15% - 5	206.80	197.86	8.94	79.89	13.22	174.77
6	ACI MEPS T110 15% - 6	201.16	197.86	3.30	10.88	7.58	57.48
7	ACI MEPS T110 15% - 7	217.42	214.15	3.27	10.66	23.84	568.19



8	ACI MEPS T110 15% - 8	225.27	214.15	11.12	123.73	31.69	1004.55
9	ACI MEPS T110 15% - 9	221.99	214.15	7.84	61.46	28.41	807.19
10	MF MEPS T130 5% - 1	163.72	161.83	1.89	3.59	-29.86	891.61
11	MF MEPS T130 5% - 2	167.14	161.83	5.32	28.28	-26.44	698.88
12	MF MEPS T130 5% - 3	167.64	161.83	5.81	33.75	-25.94	673.11
13	MF MEPS T130 5% - 4	216.60	210.26	6.34	40.17	23.02	529.95
14	MF MEPS T130 5% - 5	208.35	210.26	-1.92	3.67	14.77	218.03
15	MF MEPS T130 5% - 6	213.19	210.26	2.92	8.54	19.61	384.37
16	MF MEPS T130 5% - 7	241.33	235.08	6.25	39.09	47.76	2280.57
17	MF MEPS T130 5% - 8	235.39	235.08	0.31	0.10	41.81	1748.40
18	MF MEPS T130 5% - 9	237.17	235.08	2.09	4.35	43.59	1899.91
19	W MEPS T145 10% - 1	155.80	160.71	-4.91	24.10	-37.78	1427.22
20	W MEPS T145 10% - 2	149.38	160.71	-11.33	128.32	-44.20	1953.40
21	W MEPS T145 10% - 3	154.19	160.71	-6.52	42.51	-39.39	1551.49
22	W MEPS T145 10% - 4	182.48	192.24	-9.76	95.25	-11.10	123.28
23	W MEPS T145 10% - 5	193.08	192.24	0.84	0.71	-0.50	0.25
24	W MEPS T145 10% - 6	187.90	192.24	-4.33	18.76	-5.67	32.20
25	W MEPS T145 10% - 7	213.11	228.71	-15.60	243.28	19.53	381.39
26	W MEPS T145 10% - 8	221.37	228.71	-7.33	53.76	27.79	772.55
27	W MEPS T145 10% - 9	217.65	228.71	-11.06	122.28	24.07	579.30
SUMATORIA (Σ)					1608.50		26090.20

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Promedio (\bar{Y}) = 193.58

Coefficiente de determinación (R^2)

$$R^2 = 1 - \frac{\Sigma(Y - \hat{Y})^2}{\Sigma(Y - \bar{Y})^2}$$

$$R^2 = 1 - \frac{1608.50}{26090.20}$$

$$R^2 = 0.938$$

Coefficiente de correlación (r)

$$r = \sqrt{R^2}$$

$$r = \sqrt{0.938}$$

$$r = 0.969$$

Resultados de coeficiente de determinación.

Se midió la capacidad de predicción de la resistencia obtenida por el modelo de RNA_Fc_B con 13 variables de entrada, 12 neuronas en la capa oculta vs la resistencia a compresión real del concreto (f^c real). El valor obtenido del coeficiente de determinación es 0.938, esto significa que tiene una capacidad de predicción buena con respecto al valor real.

Resultados de coeficiente correlación de PEARSON.

Para el análisis de relación de la variable de resistencia a la compresión real (f^c real) y la predicción por el modelo RNA_Fc_B con 12 neuronas en la capa oculta. Se determino el valor del coeficiente de correlación de 0.969, esto significa que se encuentra en el rango $0.81=r=0.99$, lo cual nos indica que existe una correlación muy alta entre la resistencia a la compresión real (f^c real) y la predicción por el modelo RNA_Fc_B.

4.6.2.1.3 Análisis estadístico del modelo RNA_FC_C.

4.6.2.1.3.1 Análisis del modelo con 4 neuronas en la capa oculta.

Tabla 133:

Análisis estadístico para cálculo del coeficiente de determinación y coeficiente de correlación para un modelo RNA_FC_C con 4 neuronas en la capa oculta.

Red Neuronal Artificial RNA_Fc_C con 4 neuronas en la capa oculta							
N°	Descripción	f ^c Real	f ^c Predicción	$(Y - \hat{Y})$	$(Y - \hat{Y})^2$	$Y - \bar{Y}$	$(Y - \bar{Y})^2$
		(kg/cm ²)	(kg/cm ²)				
		Y	\hat{Y}				
1	ACI MEPS T110 15% - 1	149.05	162.01	-12.95	167.83	-44.53	1982.85
2	ACI MEPS T110 15% - 2	139.88	162.01	-22.13	489.59	-53.70	2883.80
3	ACI MEPS T110 15% - 3	143.97	162.01	-18.04	325.33	-49.61	2461.29
4	ACI MEPS T110 15% - 4	195.62	200.50	-4.89	23.88	2.04	4.16
5	ACI MEPS T110 15% - 5	206.80	200.50	6.29	39.63	13.22	174.77
6	ACI MEPS T110 15% - 6	201.16	200.50	0.66	0.43	7.58	57.48
7	ACI MEPS T110 15% - 7	217.42	225.12	-7.70	59.35	23.84	568.19
8	ACI MEPS T110 15% - 8	225.27	225.12	0.15	0.02	31.69	1004.55
9	ACI MEPS T110 15% - 9	221.99	225.12	-3.13	9.79	28.41	807.19



10	MF MEPS T130 5% - 1	163.72	164.49	-0.77	0.60	-29.86	891.61
11	MF MEPS T130 5% - 2	167.14	164.49	2.65	7.03	-26.44	698.88
12	MF MEPS T130 5% - 3	167.64	164.49	3.14	9.88	-25.94	673.11
13	MF MEPS T130 5% - 4	216.60	202.40	14.20	201.52	23.02	529.95
14	MF MEPS T130 5% - 5	208.35	202.40	5.94	35.30	14.77	218.03
15	MF MEPS T130 5% - 6	213.19	202.40	10.78	116.22	19.61	384.37
16	MF MEPS T130 5% - 7	241.33	226.53	14.80	219.09	47.76	2280.57
17	MF MEPS T130 5% - 8	235.39	226.53	8.86	78.50	41.81	1748.40
18	MF MEPS T130 5% - 9	237.17	226.53	10.63	113.09	43.59	1899.91
19	W MEPS T145 10% - 1	155.80	154.65	1.15	1.32	-37.78	1427.22
20	W MEPS T145 10% - 2	149.38	154.65	-5.27	27.76	-44.20	1953.40
21	W MEPS T145 10% - 3	154.19	154.65	-0.46	0.21	-39.39	1551.49
22	W MEPS T145 10% - 4	182.48	191.74	-9.27	85.89	-11.10	123.28
23	W MEPS T145 10% - 5	193.08	191.74	1.33	1.78	-0.50	0.25
24	W MEPS T145 10% - 6	187.90	191.74	-3.84	14.74	-5.67	32.20
25	W MEPS T145 10% - 7	213.11	218.31	-5.20	27.09	19.53	381.39
26	W MEPS T145 10% - 8	221.37	218.31	3.06	9.37	27.79	772.55
27	W MEPS T145 10% - 9	217.65	218.31	-0.67	0.44	24.07	579.30
SUMATORIA (Σ)					2065.67		26090.20

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Promedio (\bar{Y}) = 193.58

Coefficiente de determinación (R^2)

$$R^2 = 1 - \frac{\Sigma(Y - \hat{Y})^2}{\Sigma(Y - \bar{Y})^2}$$

$$R^2 = 1 - \frac{2065.67}{26090.20}$$

$$R^2 = 0.921$$

Coefficiente de correlación (r)

$$r = \sqrt{R^2}$$

$$r = \sqrt{0.921}$$

$$r = 0.960$$

Resultados de coeficiente de determinación.

Se midió la capacidad de predicción de la resistencia obtenida por el modelo de RNA_Fc_C con 10 variables de entrada, 4 neuronas en la capa oculta vs la resistencia a compresión real del concreto (f^c real). El valor obtenido del coeficiente de determinación

es 0.921, esto significa que tiene una capacidad de predicción buena con respecto al valor real.

Resultados de coeficiente correlación de PEARSON.

Para el análisis de relación de la variable de resistencia a la compresión real (f^c real) y la predicción por el modelo RNA_Fc_C con 4 neuronas en la capa oculta. Se determino el valor del coeficiente de correlación de 0.960, esto significa que se encuentra en el rango $0.81=r=0.99$, lo cual nos indica que existe una correlación muy alta entre la resistencia a la compresión real (f^c real) y la predicción por el modelo RNA_Fc_C.

4.6.2.1.4 Análisis estadístico del modelo RNA_FC_D.

4.6.2.1.4.1 Análisis del modelo con 8 neuronas en la capa oculta.

Tabla 134:

Análisis estadístico para cálculo del coeficiente de determinación y coeficiente de correlación para un modelo RNA_FC_D con 8 neuronas en la capa oculta.

Red Neuronal Artificial RNA_Fc_D con 8 neuronas en la capa oculta							
N°	Descripción	f ^c Real	f ^c Predicción	$(Y - \hat{Y})$	$(Y - \hat{Y})^2$	$Y - \bar{Y}$	$(Y - \bar{Y})^2$
		(kg/cm ²)	(kg/cm ²)				
		Y	\hat{Y}				
1	ACI MEPS T110 15% - 1	149.05	164.12	-15.06	226.94	-44.53	1982.85
2	ACI MEPS T110 15% - 2	139.88	164.12	-24.24	587.41	-53.70	2883.80
3	ACI MEPS T110 15% - 3	143.97	164.12	-20.15	405.89	-49.61	2461.29
4	ACI MEPS T110 15% - 4	195.62	183.99	11.63	135.18	2.04	4.16
5	ACI MEPS T110 15% - 5	206.80	183.99	22.81	520.20	13.22	174.77
6	ACI MEPS T110 15% - 6	201.16	183.99	17.17	294.78	7.58	57.48
7	ACI MEPS T110 15% - 7	217.42	223.28	-5.87	34.41	23.84	568.19
8	ACI MEPS T110 15% - 8	225.27	223.28	1.99	3.97	31.69	1004.55
9	ACI MEPS T110 15% - 9	221.99	223.28	-1.29	1.67	28.41	807.19
10	MF MEPS T130 5% - 1	163.72	162.50	1.22	1.49	-29.86	891.61
11	MF MEPS T130 5% - 2	167.14	162.50	4.65	21.58	-26.44	698.88
12	MF MEPS T130 5% - 3	167.64	162.50	5.14	26.39	-25.94	673.11
13	MF MEPS T130 5% - 4	216.60	208.03	8.57	73.45	23.02	529.95
14	MF MEPS T130 5% - 5	208.35	208.03	0.32	0.10	14.77	218.03
15	MF MEPS T130 5% - 6	213.19	208.03	5.15	26.57	19.61	384.37



16	MF MEPS T130 5% - 7	241.33	226.45	14.89	221.57	47.76	2280.57
17	MF MEPS T130 5% - 8	235.39	226.45	8.94	79.99	41.81	1748.40
18	MF MEPS T130 5% - 9	237.17	226.45	10.72	114.87	43.59	1899.91
19	W MEPS T145 10% - 1	155.80	150.40	5.40	29.16	-37.78	1427.22
20	W MEPS T145 10% - 2	149.38	150.40	-1.02	1.04	-44.20	1953.40
21	W MEPS T145 10% - 3	154.19	150.40	3.79	14.36	-39.39	1551.49
22	W MEPS T145 10% - 4	182.48	180.05	2.42	5.88	-11.10	123.28
23	W MEPS T145 10% - 5	193.08	180.05	13.03	169.69	-0.50	0.25
24	W MEPS T145 10% - 6	187.90	180.05	7.85	61.66	-5.67	32.20
25	W MEPS T145 10% - 7	213.11	217.81	-4.70	22.12	19.53	381.39
26	W MEPS T145 10% - 8	221.37	217.81	3.56	12.69	27.79	772.55
27	W MEPS T145 10% - 9	217.65	217.81	-0.16	0.03	24.07	579.30
SUMATORIA (Σ)					3093.08		26090.20

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Promedio (\bar{Y}) = 193.58

Coefficiente de determinación (R^2)

$$R^2 = 1 - \frac{\Sigma(Y - \hat{Y})^2}{\Sigma(Y - \bar{Y})^2}$$

$$R^2 = 1 - \frac{3093.08}{26090.20}$$

$$R^2 = 0.881$$

Coefficiente de correlación (r)

$$r = \sqrt{R^2}$$

$$r = \sqrt{0.881}$$

$$r = 0.939$$

Resultados de coeficiente de determinación.

Se midió la capacidad de predicción de la resistencia obtenida por el modelo de RNA_Fc_D con 8 variables de entrada, 8 neuronas en la capa oculta vs la resistencia a compresión real del concreto (f^c real). El valor obtenido del coeficiente de determinación es 0.881, esto significa que tiene una capacidad de predicción buena con respecto al valor real.

Resultados de coeficiente correlación de PEARSON.

Para el análisis de relación de la variable de resistencia a la compresión real (f^c real) y la predicción por el modelo RNA_Fc_D con 8 neuronas en la capa oculta. Se determino el valor del coeficiente de correlación de 0.939, esto significa que se encuentra en el rango $0.81=r=0.99$, lo cual nos indica que existe una correlación muy alta entre la resistencia a la compresión real (f^c real) y la predicción por el modelo RNA_Fc_D.

4.6.2.2 Consolidado del análisis estadístico modelos de RNA.

En la tabla 138 se muestra el resumen de los valores obtenidos para el coeficiente de determinación y coeficiente de correlación (R^2) para los cuatro modelos de RNA para la predicción de la resistencia a la compresión del concreto.

Tabla 135:

Resumen de análisis estadístico para cálculo del coeficiente de determinación y coeficiente de correlación de los modelos de RNA.

N°	Modelos	Número de entradas	Numero de neuronas en la capa oculta	Numero de salidas	Estadísticos	
					Coefficiente de determinación (R^2)	Coefficiente de correlación (r)
1	RNA_FC_A	16	4	1	0.909	0.953
2	RNA_FC_B	13	12	1	0.938	0.969
3	RNA_FC_C	10	4	1	0.921	0.960
4	RNA_FC_D	8	8	1	0.881	0.939

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

4.6.3 Análisis estadístico de los modelos de RNA para la predicción de la trabajabilidad del concreto.

4.6.3.1 Análisis estadístico de los modelos de RNA por el número de neuronas en capa oculta.

Para poder probar los modelos de RNA_S_A, RNA_S_B y RNA_S_C; se utilizó los indicadores estadísticos que son el coeficiente de determinación (R^2) y el coeficiente de correlación de PEARSON (r). Los cuales evaluaron el comportamiento de los valores

predichos por los cuatro modelos de RNA respecto al valor real de la trabajabilidad del concreto (SLUMP).

4.6.3.1.1 Análisis estadístico del modelo RNA_S_A.

4.6.3.1.1.1 Análisis del modelo con 16 neuronas en la capa oculta.

Tabla 136:

Análisis estadístico para cálculo del coeficiente de determinación y coeficiente de correlación para un modelo RNA_S_A con 16 neuronas.

Red Neuronal Artificial RNA_S_A con 16 neuronas en la capa oculta							
N°	Descripción	Slump Real (Pulgadas)	Slump Predicción (Pulgadas)	$(Y - \hat{Y})$	$(Y - \hat{Y})^2$	$Y - \bar{Y}$	$(Y - \bar{Y})^2$
		Y	\hat{Y}				
1	ACI MEPS T110 5%	3.80	2.91	0.89	0.80	1.73	3.00
2	ACI MEPS T130 10%	2.20	2.03	0.17	0.03	0.13	0.02
3	ACI MEPS T145 15%	1.30	1.14	0.16	0.03	-0.77	0.59
4	MF MEPS T110 15%	1.80	1.99	-0.19	0.04	-0.27	0.07
5	MF MEPS T145 15%	1.00	1.27	-0.27	0.07	-1.07	1.14
6	W MEPS T130 5%	2.30	2.93	-0.63	0.40	0.23	0.05
SUMATORIA (Σ)					1.36		4.87

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Promedio (\bar{Y}) = 2.07

Coeficiente de determinación (R^2)

$$R^2 = 1 - \frac{\Sigma(Y - \hat{Y})^2}{\Sigma(Y - \bar{Y})^2}$$

$$R^2 = 1 - \frac{1.36}{4.87}$$

$$R^2 = 0.720$$

Coeficiente de correlación (r)

$$r = \sqrt{R^2}$$

$$r = \sqrt{0.720}$$

$$r = 0.849$$

Resultados de coeficiente de determinación.

Se midió la capacidad de predicción de la resistencia obtenida por el modelo de RNA_S_A con 12 variables de entrada, 16 neuronas en la capa oculta vs trabajabilidad del concreto (SLUMP). El valor obtenido del coeficiente de determinación es 0.720, esto significa que tiene una capacidad de predicción no muy buena con respecto al valor real.

Resultados de coeficiente correlación de PEARSON.

Para el análisis de relación de la variable de trabajabilidad del concreto (SLUMP real) y la predicción por el modelo RNA_S_A con 16 neuronas en la capa oculta. Se determino el valor del coeficiente de correlación de 0.849, esto significa que se encuentra en el rango $0.81=r=0.99$, lo cual nos indica que existe una correlación muy alta entre la trabajabilidad del concreto (SLUMP) y la predicción por el modelo RNA_S_A.

4.6.3.1.2 Análisis estadístico del modelo RNA_S_B.

4.6.3.1.2.1 Análisis del modelo con 8 neuronas en la capa oculta.

Tabla 137:

Análisis estadístico para cálculo del coeficiente de determinación y coeficiente de correlación para un modelo RNA_S_B con 8 neuronas.

Red Neuronal Artificial RNA_S_B con 8 neuronas en la capa oculta							
N°	Descripción	Slump Real	Slump	$(Y - \hat{Y})$	$(Y - \hat{Y})^2$	$Y - \bar{Y}$	$(Y - \bar{Y})^2$
		(Pulgadas)	Predicción				
		Y	\hat{Y}				
1	ACI MEPS T110 5%	3.80	3.17	0.63	0.40	1.73	3.00
2	ACI MEPS T130 10%	2.20	2.31	-0.11	0.01	0.13	0.02
3	ACI MEPS T145 15%	1.30	1.12	0.18	0.03	-0.77	0.59
4	MF MEPS T110 15%	1.80	1.89	-0.09	0.01	-0.27	0.07
5	MF MEPS T145 15%	1.00	1.14	-0.14	0.02	-1.07	1.14
6	W MEPS T130 5%	2.30	3.10	-0.80	0.64	0.23	0.05
SUMATORIA (Σ)					1.10		4.87

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Promedio (\bar{Y}) = 2.07

Coeficiente de determinación (R^2)

$$R^2 = 1 - \frac{\Sigma(Y - \hat{Y})^2}{\Sigma(Y - \bar{Y})^2}$$

$$R^2 = 1 - \frac{1.10}{4.87}$$

$$R^2 = 0.773$$

Coefficiente de correlación (r)

$$r = \sqrt{R^2}$$

$$r = \sqrt{0.773}$$

$$r = 0.879$$

Resultados de coeficiente de determinación.

Se midió la capacidad de predicción de la resistencia obtenida por el modelo de RNA_S_A con 9 variables de entrada, 8 neuronas en la capa oculta vs trabajabilidad del concreto (SLUMP). El valor obtenido del coeficiente de determinación es 0.773, esto significa que tiene una capacidad de predicción no muy buena con respecto al valor real.

Resultados de coeficiente correlación de PEARSON.

Para el análisis de relación de la variable de trabajabilidad del concreto (SLUMP real) y la predicción por el modelo RNA_S_B con 8 neuronas en la capa oculta. Se determino el valor del coeficiente de correlación de 0.879, esto significa que se encuentra en el rango 0.81=r=0.99, lo cual nos indica que existe una correlación muy alta entre la trabajabilidad del concreto (SLUMP) y la predicción por el modelo RNA_S_B.

4.6.3.1.3 Análisis estadístico del modelo RNA_S_C.

4.6.3.1.3.1 Análisis del modelo con 4 neuronas en la capa oculta.

Tabla 138:

Análisis estadístico para cálculo del coeficiente de determinación y coeficiente de correlación para un modelo RNA_S_C con 4 neuronas.

Red Neuronal Artificial RNA_S_C con 4 neuronas en la capa oculta							
N°	Descripción	Slump Real (Pulgadas)	Slump Predicción (Pulgadas)	$(Y - \hat{Y})$	$(Y - \hat{Y})^2$	$Y - \bar{Y}$	$(Y - \bar{Y})^2$
		Y	\hat{Y}				
1	ACI MEPS T110 5%	3.80	3.19	0.61	0.38	1.73	3.00
2	ACI MEPS T130 10%	2.20	2.27	-0.07	0.00	0.13	0.02
3	ACI MEPS T145 15%	1.30	1.04	0.26	0.07	-0.77	0.59
4	MF MEPS T110 15%	1.80	1.93	-0.13	0.02	-0.27	0.07
5	MF MEPS T145 15%	1.00	1.06	-0.06	0.00	-1.07	1.14
6	W MEPS T130 5%	2.30	3.10	-0.80	0.64	0.23	0.05
SUMATORIA (Σ)					1.11		4.87

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Promedio (\bar{Y}) = 2.07

Coeficiente de determinación (R^2)

$$R^2 = 1 - \frac{\Sigma(Y - \hat{Y})^2}{\Sigma(Y - \bar{Y})^2}$$

$$R^2 = 1 - \frac{1.11}{4.87}$$

$$R^2 = 0.771$$

Coeficiente de correlación (r)

$$r = \sqrt{R^2}$$

$$r = \sqrt{0.771}$$

$$r = 0.878$$

Resultados de coeficiente de determinación.

Se midió la capacidad de predicción de la resistencia obtenida por el modelo de RNA_S_C con 6 variables de entrada, 4 neuronas en la capa oculta vs trabajabilidad del concreto (SLUMP). El valor obtenido del coeficiente de determinación es 0.771, esto significa que tiene una capacidad de predicción no muy buena con respecto al valor real.

Resultados de coeficiente correlación de PEARSON.

Para el análisis de relación de la variable de trabajabilidad del concreto (SLUMP real) y la predicción por el modelo RNA_S_A con 4 neuronas en la capa oculta. Se determino el valor del coeficiente de correlación de 0.878, esto significa que se encuentra en el rango $0.81=r=0.99$, lo cual nos indica que existe una correlación muy alta entre la trabajabilidad del concreto (SLUMP) y la predicción por el modelo RNA_S_C.

4.6.3.2 Consolidado del análisis estadístico modelos de RNA

En la tabla 141 se muestra el resumen de los valores obtenidos para el coeficiente de determinación y coeficiente de correlación (R^2) para los tres modelos de RNA para la predicción de la trabajabilidad del concreto.

Tabla 139:

Resumen de análisis estadístico para cálculo del coeficiente de determinación y coeficiente de correlación de los modelos de RNA.

N°	Modelos	Número de entradas	Numero de neuronas en la capa oculta	Numero de salidas	Estadísticos	
					Coeficiente de determinación (R^2)	Coeficiente de correlación (r)
1	RNA_S_A	12	16	1	0.720	0.849
2	RNA_S_B	9	8	1	0.773	0.879
3	RNA_S_C	6	4	1	0.771	0.878

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

4.7 VALIDACIÓN DE HIPÓTESIS

En el estudio se plantea la hipótesis siguiente:

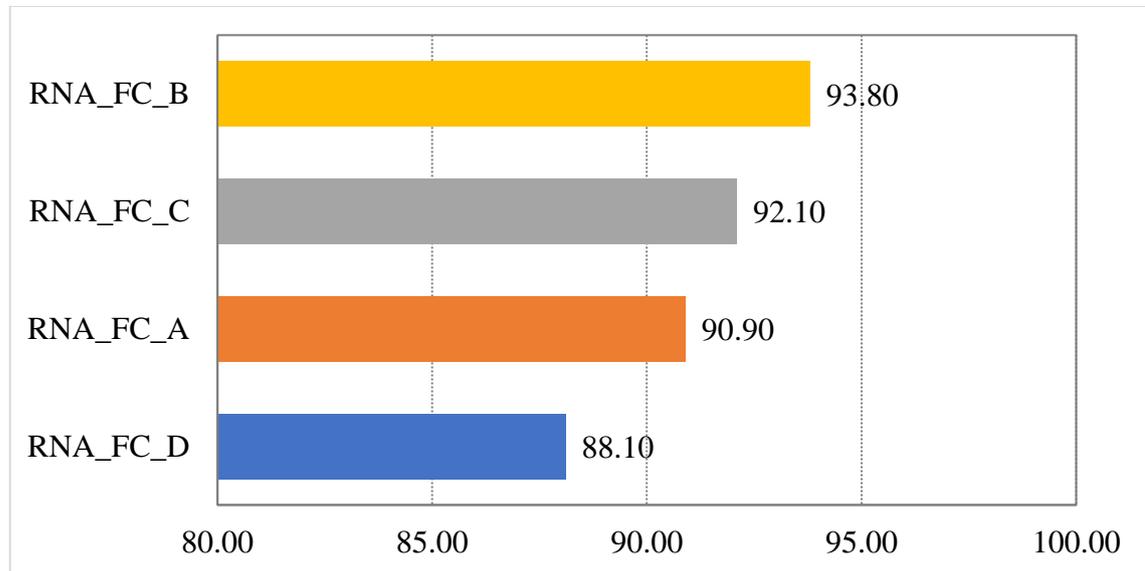
La red neuronal artificial es eficaz en la predicción de la resistencia a la compresión y trabajabilidad del concreto ligero con esferas de poliestireno expandido modificado (MEPS).

Para la predicción de la resistencia a la compresión mediante modelos de Redes Neuronales Artificiales se obtuvieron 270 registros para la elaboración se utilizaron solamente el 90% que corresponden a 243 para la elaboración de 4 modelos de RNA. Y los 10% restantes correspondientes a 27 registros fueron utilizados para probar la eficacia en la predicción de la resistencia a compresión.

Se selecciono la mejor arquitectura para cada modelo respecto al número de neuronas con mejor comportamiento de acuerdo al error cuadrático medio MSE. Y con los 27 registros se probó la eficacia en la predicción, evaluados mediante el coeficiente de determinación R^2 y coeficiente de correlación (r) presentados en la sección **4.6.2** *Análisis estadístico de los modelos de RNA para la predicción de la resistencia a la compresión del concreto $f'c$* . Obteniendo una capacidad predictiva R^2 superior al 85% y una correlación muy alta superior al 90% para los cuatro modelos. De los cuales el que logro una mejor eficacia en predicción fue el modelo RNA_FC_B con una capacidad predictiva R^2 de 93.80%. Las cuales se muestran en la figura 98.

Figura 98:

Capacidad de predicción para cada uno de los modelos de RNA para predicción de la resistencia a compresión.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

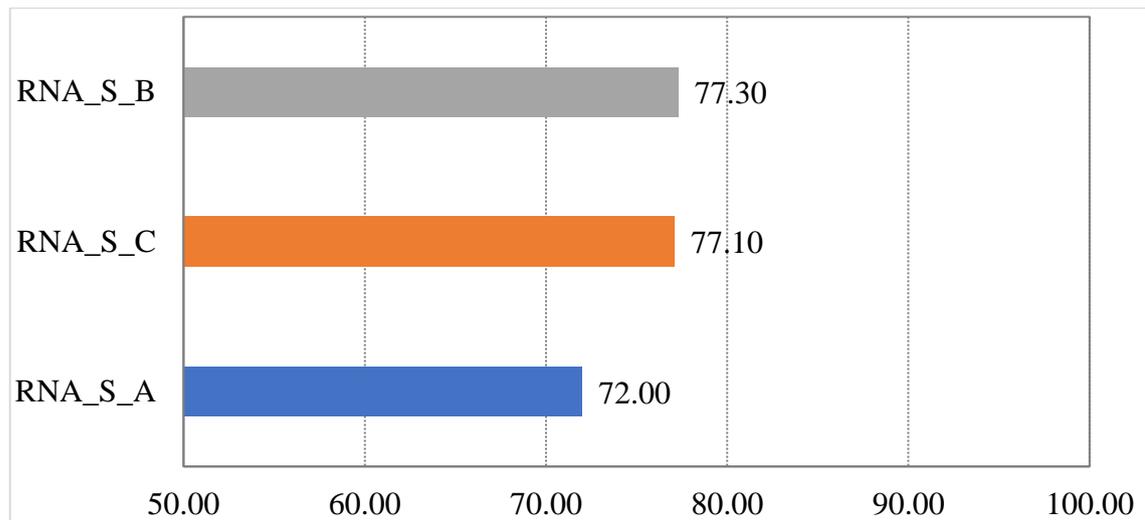
Para la predicción de la trabajabilidad del concreto SLUMP mediante modelos de Redes Neuronales Artificiales se obtuvieron 30 registros para la elaboración se utilizaron solamente el 80% que corresponden a 24 para la elaboración de 4 modelos de RNA. Y los 20% restantes correspondientes a 6 registros fueron utilizados para probar la eficacia en la predicción de la resistencia a compresión.

Se selecciono la mejor arquitectura para cada modelo respecto al número de neuronas con mejor comportamiento de acuerdo al error cuadrático medio MSE. Y con los 6 registros se probó la eficacia en la predicción, evaluados mediante el coeficiente de determinación R^2 y coeficiente de correlación (r) presentados en la sección **4.6.3 Análisis estadístico de los modelos de RNA para la predicción de la trabajabilidad del concreto**. Obteniendo una capacidad predictiva R^2 superior al 70% y una correlación muy alta superior al 80% para los cuatro modelos. De los cuales el que logro una mejor eficacia en

predicción fue el modelo RNA_S_B con una capacidad predictiva R^2 de 77.30%. Las cuales se muestran en la figura 99.

Figura 99:

Capacidad de predicción para cada uno de los modelos de RNA para predicción de la trabajabilidad del concreto SLUMP.



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

De esta forma podemos dar por verdadera la Hipótesis, donde se planteó que la red neuronal artificial es eficaz en la predicción de la resistencia a la compresión y trabajabilidad de un concreto con esferas de poliestireno expandido modificado (MEPS).

4.8 PRUEBA DE HIPOTESIS

Para la prueba de hipótesis en la presente investigación se utilizó el análisis de varianza ANOVA en el programa estadístico Minitab 2021, el cual nos permitió determinar la existencia de diferencia significativa entre las medias de las predicciones de las propiedades en estado fresco y endurecido de los modelos de redes neuronales artificiales RNA

Para realizar el análisis de varianza ANOVA de un solo factor se requieren los siguientes datos.

- Hipótesis nula (H_0): Todas las medias son iguales ($p > \alpha$) → Se acepta la hipótesis nula.
- Hipótesis alterna (H_1): No todas las medias son iguales ($p < \alpha$) Se rechaza la hipótesis nula.
- Nivel de confianza individual: 95%.
- Nivel de significancia (α): 5%.

4.8.1 Prueba de hipótesis modelos de RNA para la predicción de la resistencia a la compresión del concreto f'_c .

Tabla 140:

Resistencia a compresión real y predicciones obtenidas mediante modelos de RNA utilizados para la prueba ANOVA.

N°	Descripción	DIAS	fc Real	RNA_Fc_A 4 neuronas	RNA_Fc_B 12 neuronas	RNA_Fc_C 4 neuronas	RNA_Fc_D 8 neuronas
1	ACI MEPS T110 15% - 1	7	149.05	162.02	155.61	162.01	164.12
2	ACI MEPS T110 15% - 2	7	139.88	162.02	155.61	162.01	164.12
3	ACI MEPS T110 15% - 3	7	143.97	162.02	155.61	162.01	164.12
4	ACI MEPS T110 15% - 4	14	195.62	199.25	197.86	200.50	183.99
5	ACI MEPS T110 15% - 5	14	206.80	199.25	197.86	200.50	183.99
6	ACI MEPS T110 15% - 6	14	201.16	199.25	197.86	200.50	183.99
7	ACI MEPS T110 15% - 7	28	217.42	233.96	214.15	225.12	223.28
8	ACI MEPS T110 15% - 8	28	225.27	233.96	214.15	225.12	223.28
9	ACI MEPS T110 15% - 9	28	221.99	233.96	214.15	225.12	223.28
10	MF MEPS T130 5% - 1	7	163.72	177.65	161.83	164.49	162.50
11	MF MEPS T130 5% - 2	7	167.14	177.65	161.83	164.49	162.50
12	MF MEPS T130 5% - 3	7	167.64	177.65	161.83	164.49	162.50
13	MF MEPS T130 5% - 4	14	216.60	217.11	210.26	202.40	208.03
14	MF MEPS T130 5% - 5	14	208.35	217.11	210.26	202.40	208.03
15	MF MEPS T130 5% - 6	14	213.19	217.11	210.26	202.40	208.03
16	MF MEPS T130 5% - 7	28	241.33	241.18	235.08	226.53	226.45
17	MF MEPS T130 5% - 8	28	235.39	241.18	235.08	226.53	226.45
18	MF MEPS T130 5% - 9	28	237.17	241.18	235.08	226.53	226.45
19	W MEPS T145 10% - 1	7	155.80	151.27	160.71	154.65	150.40
20	W MEPS T145 10% - 2	7	149.38	151.27	160.71	154.65	150.40
21	W MEPS T145 10% - 3	7	154.19	151.27	160.71	154.65	150.40
22	W MEPS T145 10% - 4	14	182.48	180.90	192.24	191.74	180.05
23	W MEPS T145 10% - 5	14	193.08	180.90	192.24	191.74	180.05
24	W MEPS T145 10% - 6	14	187.90	180.90	192.24	191.74	180.05
25	W MEPS T145 10% - 7	28	213.11	215.53	228.71	218.31	217.81
26	W MEPS T145 10% - 8	28	221.37	215.53	228.71	218.31	217.81
27	W MEPS T145 10% - 9	28	217.65	215.53	228.71	218.31	217.81

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la Tabla 141 se presentan la resistencia a la compresión real y las obtenidas mediante la predicción de los modelos de redes neuronales artificiales (fc Real, RNA_FC_A, RNA_FC_B, RNA_FC_C y RNA_FC_D), las cuales fueron utilizados para la prueba de hipótesis mediante el uso del análisis de varianza ANOVA.

Tabla 141:

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
Factor	5	fc Real; RNA_Fc_A 4 neuronas; RNA_Fc_B 12 neuronas; RNA_Fc_C 4 neuronas; RNA_Fc_D 8 neuronas

Fuente: Minitab 2021

En la Tabla 142, se muestra el análisis de varianza ANOVA donde se toma como factor el valor real de la resistencia a la compresión y las predicciones por los diferentes modelos de RNA desarrollados estos son expresados por el programa Minitab 2021.

Tabla 142:

Medias, desviación estándar e intervalos de confianza del 95% para cada factor.

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
fc Real	27	193.58	31.68	(182.49; 204.67)
RNA_Fc_A 4 neuronas	27	197.65	30.41	(186.57; 208.74)
RNA_Fc_B 12 neuronas	27	195.16	28.79	(184.08; 206.25)
RNA_Fc_C 4 neuronas	27	193.97	26.7	(182.89; 205.06)
RNA_Fc_D 8 neuronas	27	190.74	27.72	(179.65; 201.82)

Desv.Est. agrupada = 29.1160

Fuente: Minitab 2021

En la tabla 143, se muestra el número de datos, media, desviación estándar y intervalo de confianza al 95 % para cada uno de los factores obtenidos por el programa Minitab 2021. El intervalo de confianza se puede interpretar como la probabilidad de volver a usar los modelos de RNA y obtener valores dentro de los rangos obtenidos.

Tabla 143:*Análisis de varianza*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	4	682	170.5	0.2	0.937
Error	130	110207	847.7		
Total	134	110889			

Fuente: Minitab 2021

En la tabla 144, se muestra que el valor obtenido de p fue de 0.937, lo cual significa que p es mayor que el nivel de significancia ($\alpha=0.05$), lo cual nos indica que las medias de la resistencia a compresión real y de los modelos fueron estadísticamente iguales.

4.8.1.1 Prueba de hipótesis utilizando análisis de varianza ANOVA para modelos de RNA para la predicción de la resistencia a la compresión del concreto f'c.**a. Formulación de Hipótesis.**

H₀ = Existe una diferencia significativa entre las medias de la resistencia a la compresión real (fc Real) con las obtenidas mediante redes neuronales artificiales (RNA_FC_A, RNA_FC_B, RNA_FC_C y RNA_FC_D).

H₁ = No existe una diferencia significativa entre las medias de la resistencia a la compresión real (fc Real) con las obtenidas mediante redes neuronales artificiales (RNA_FC_A, RNA_FC_B, RNA_FC_C y RNA_FC_D).

b. Nivel de significancia.

Nivel de significancia de $\alpha = 0.05$ con 95 % de confianza.

c. Regla de decisión.

Dado que:

$$p > \alpha \quad ; \quad 0.937 > 0.05$$

Se acepta la hipótesis nula H₀

Esto indica que, si existe una diferencia significativa entre las medias, por tanto:

Se rechaza la hipótesis nula H1

d. Conclusión.

“Se acepta Ho”

Puesto que $p > \alpha$; $0.937 > 0.05$ se concluye que existe una diferencia significativa entre las medias de la resistencia a la compresión real (fc Real) con las obtenidas mediante redes neuronales artificiales (RNA_FC_A, RNA_FC_B, RNA_FC_C y RNA_FC_D).

4.8.2 Prueba de hipótesis modelos de RNA para la predicción de la trabajabilidad del concreto.

Tabla 144:

Trabajabilidad real y predicciones obtenidas mediante modelos de RNA utilizados para la prueba ANOVA.

N°	Descripción	Slump Real	RNA_S_A 16 neuronas	RNA_S_B 8 neuronas	RNA_S_C 4 neuronas
1	ACI MEPS T110 5%	3.80	2.91	3.17	3.19
2	ACI MEPS T130 10%	2.20	2.03	2.31	2.27
3	ACI MEPS T145 15%	1.30	1.14	1.12	1.04
4	MF MEPS T110 15%	1.80	1.99	1.89	1.93
5	MF MEPS T145 15%	1.00	1.27	1.14	1.06
6	W MEPS T130 5%	2.30	2.93	3.10	3.10

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la Tabla 145 se presentan la trabajabilidad real del concreto y las obtenidas mediante la predicción de los modelos de redes neuronales artificiales (Slump Real, RNA_S_A, RNA_S_B y RNA_S_C), las cuales fueron utilizados para la prueba de hipótesis mediante el uso del análisis de varianza ANOVA.

Tabla 145:*Información del factor*

Factor	Niveles	Valores
Factor	4	Slump Real; RNA_S_A 16 neuronas; RNA_S_B 8 neuronas; RNA_S_C 4 neuronas

Fuente: Minitab 2021

En la tabla 146, se muestra el análisis de varianza ANOVA donde se toma como factor el valor real de la resistencia a la compresión y las predicciones por los diferentes modelos de RNA desarrollados estos son expresados por el programa Minitab 2021.

Tabla 146.*Medias, desviación estándar e intervalos de confianza del 95% para cada factor.*

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
Slump Real	6	2.067	0.987	(1.295; 2.838)
RNA_S_A 16 neuronas	6	2.044	0.77	(1.272; 2.815)
RNA_S_B 8 neuronas	6	2.122	0.906	(1.350; 2.893)
RNA_S_C 4 neuronas	6	2.096	0.945	(1.325; 2.867)

Desv.Est. agrupada = 0.905652

Fuente: Minitab 2021

En la tabla 147, se muestra el número de datos, media, desviación estándar y intervalo de confianza al 95 % para cada uno de los factores obtenidos por el programa Minitab 2021. El intervalo de confianza se puede interpretar como la probabilidad de volver a usar los modelos de RNA y obtener valores dentro de los rangos obtenidos.

Tabla 147:*Análisis de varianza.*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	3	0.02090	0.006950	0.01	0.999
Error	20	16.40410	0.820206		
Total	23	16.42500			

Fuente: Minitab 2021

En la tabla 148, el valor obtenido de p fue de 0.999, lo cual significa que p es mayor que el nivel de significancia ($\alpha=0.05$), lo cual nos indica que las medias de la trabajabilidad real y de los modelos fueron estadísticamente iguales.

4.8.1.1 Prueba de hipótesis utilizando análisis de varianza ANOVA para modelos de RNA para la predicción de la trabajabilidad del concreto SLUMP.

e. Formulación de Hipótesis.

H₀ = Existe una diferencia significativa entre las medias de la trabajabilidad del concreto (Slump real) con las obtenidas mediante redes neuronales artificiales (RNA_S_A, RNA_S_B y RNA_S_C).

H₁ = No existe una diferencia significativa entre las medias de la trabajabilidad del concreto (Slump real) con las obtenidas mediante redes neuronales artificiales (RNA_S_A, RNA_S_B y RNA_S_C).

f. Nivel de significancia.

Nivel de significancia de $\alpha = 0.05$ con 95 % de confianza.

g. Regla de decisión.

Dado que:

$$p > \alpha \quad ; \quad 0.999 > 0.05$$

Se acepta la hipótesis nula H_0

Esto indica que, si existe una diferencia significativa entre las medias, por tanto:

Se rechaza la hipótesis nula H_1

h. Conclusión.

“Se acepta H_0 ”

Puesto que $p > \alpha$; $0.999 > 0.05$ se concluye que existe una diferencia significativa entre las medias de la trabajabilidad del concreto (Slump real) con las obtenidas mediante redes neuronales artificiales (RNA_S_A, RNA_S_B y RNA_S_C).

4.9 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.9.1 Modelo de Red Neuronal Artificial para predecir la resistencia a la compresión del concreto con MEPS.

En la investigación se elaboraron cuatro modelos de RNA para predecir la resistencia a la compresión del concreto los cuales fueron RNA_FC_A, RNA_FC_B, RNA_FC_C y RNA_FC_D cada una con sus respectivas variables de entrada, número de neuronas en la capa oculta y una variable de salida. Para medir la capacidad de predicción se estos modelos se utilizó el coeficiente de correlación (R^2) para cada uno modelos, estos resultados se encuentran en un rango de **88.1% – 93.8%**. Esto quiere decir que los modelos tienen una capacidad de predicción de la resistencia a la compresión entre buena y muy buena; respecto al valor real (f^c). Estos resultados son parecidos a los obtenidos por (Vega, 2019) quien en su investigación consiguió elaborar modelos predictivos para resistencia a la compresión con un coeficiente de determinación mayores a 90%. Otro de las investigaciones con resultados parecidos fue (Díaz, 2017) quien en su investigación elaboro cinco modelos de Redes Neuronales Artificiales obteniendo coeficientes de R^2 entre 87% y 98%. En tal sentido respecto a lo referido anteriormente y analizando estos resultados se puede confirmar que el uso de RNA para predicción de resistencia a la compresión obtenemos valores con buena capacidad predictiva respecto al valor real.

4.9.2 Modelo de Red Neuronal Artificial para predecir la trabajabilidad del concreto con MEPS.

En la investigación se elaboraron tres modelos de RNA para predecir la trabajabilidad del concreto los cuales fueron RNA_S_A, RNA_S_B y RNA_S_C cada una con sus respectivas variables de entrada, número de neuronas en la capa oculta y una variable de salida. Para medir la capacidad de predicción se estos modelos se utilizó el coeficiente de correlación (R^2) para cada uno modelos, estos resultados se encuentran en

un rango de **72.0% – 77.3%**. Esto quiere decir que los modelos tienen una capacidad de predicción de la resistencia a la compresión no muy buena respecto al valor real (Slump) esto se debe a la cantidad de datos no obteniendo una precisión elevada. Estos resultados son parecidos a los obtenidos por (Deepak et al., 2019) quien en su artículo de investigación consiguió elaborar modelos predictivos para la trabajabilidad del concreto (SLUMP) obteniendo un coeficiente de determinación de R^2 mayores a 70%. En tal sentido respecto a lo referido analizando los resultados se puede confirmar el uso de RNA para predicción de la trabajabilidad del concreto SLUMP se obtienen valores de predicción regularmente buenos lo cual se debe a la cantidad de datos utilizados para la elaboración de la RNA.

4.9.3 Arquitectura de red neuronal artificial más eficaz para la predicción de la resistencia a compresión y trabajabilidad en concreto ligero con MEPS.

En la presente investigación se desarrollaron dos modelos por separado uno para la predicción de la resistencia a la compresión y el otro para la predicción de la trabajabilidad del concreto, es por ello que cada una cuenta con una arquitectura diferente es por ello que se realizó la discusión por separado.

- Se elaboraron cuatro modelos de RNA para predecir la resistencia a la compresión del concreto los cuales fueron RNA_FC_A, RNA_FC_B, RNA_FC_C y RNA_FC_D, cada modelo tiene una arquitectura diferente respecto al número de entradas, número de neuronas en la capa oculta y una salida; es por ello que para determinar cuál es la arquitectura con mejor comportamiento se utilizó el cálculo del Error Cuadrático Medio MSE el cual mientras más mínimo valor se obtiene nos indica cual es la mejor arquitectura. Obteniendo las mejores arquitecturas para cada modelo RNA_FC_A [16-4-1] con un MSE de 30.78, RNA_FC_B [13-12-1] con un MSE de 25.79, RNA_FC_C [10-4-1] con un MSE de 53.41 y RNA_FC_D



[8-8-1] con un MSE de 40.31. Esto quiere decir que la arquitectura más eficaz para la predicción de la resistencia a la compresión es RNA_FC_B al contar con un menor MSE de 25.79, contando con una arquitectura de [13-12-1] (13 variables de entrada, 12 neuronas en la capa oculta y una salida). Estos resultados difieren de acuerdo a lo obtenido por (Díaz, 2017) quien en su trabajo de investigación realizó un modelo Red_neuronal_2 obteniendo una arquitectura más óptima de [21-8-6-1] (21 variables de entrada, 8 neuronas en la capa oculta, 6 neuronas en la segunda capa oculta y una salida) con un MSE de 0.001670. En tal sentido bajo lo referido anteriormente y analizando los resultados se observa que la selección de la arquitectura más eficaz para cada modelo dependerá de las variables utilizadas, el número de capas ocultas con sus respectivas neuronas las cuales influyen directamente en la obtención de un MSE más eficaz.

- Se elaboraron tres modelos de RNA para predecir la trabajabilidad del concreto, los cuales fueron RNA_S_A, RNA_S_B y RNA_S_C, cada modelo tiene una arquitectura diferente respecto al número de entradas, número de neuronas en la capa oculta y una salida; es por ello que para determinar cuál es la arquitectura con mejor comportamiento se utilizó el cálculo del Error Cuadrático Medio MSE el cual mientras más mínimo valor se obtiene nos indica cual es la mejor arquitectura. Obteniendo las mejores arquitecturas para cada modelo RNA_S_A [12-16-1] con un MSE de 0.165, RNA_S_B [9-8-1] con un MSE de 0.157 y RNA_S_C [6-4-1] con un MSE de 0.157. Esto quiere decir que la arquitectura más eficaz para la predicción de la resistencia a la compresión es RNA_S_B al contar con un menor MSE de 0.157, contando con una arquitectura de [9-8-1] (9 variables de entrada, 8 neuronas en la capa oculta y una salida). Estos resultados difieren de acuerdo a lo obtenido por (Deepak et al., 2019) quien en su trabajo de



investigación obtuvo un modelo de RNA ANN-6 [7-8-1] (7 variables de entrada, 8 neuronas en la capa oculta y una salida) con un MSE de 0.04019. En tal sentido bajo lo referido anteriormente y analizando los resultados se observa que la selección de la arquitectura más eficaz para cada modelo dependerá de las variables utilizadas, el número de capas ocultas con sus respectivas neuronas las cuales influyen directamente en la obtención de un MSE más eficaz.

V. CONCLUSIONES

5.1 CONCLUSIONES GENERAL

En esta tesis se evaluó la eficacia de los modelos de redes neuronales artificiales (RNA) en la predicción de la resistencia a la compresión de un concreto ligero con MEPS obteniendo una capacidad predictiva R^2 superior al 90% como también en la predicción de la trabajabilidad del concreto ligero con MEPS obteniendo una capacidad predictiva R^2 superior al 70%.

5.2 CONCLUSIONES ESPECIFICAS

- De acuerdo al primero objetivo específico se ha desarrollado un modelo de red neuronal artificial para predecir la resistencia a la compresión del concreto ligero con esferas de poliestireno expandido modificado (MEPS), este modelo es el RNA_Fc_B obteniendo un valor de correlación muy alta entre la resistencia real y la resistencia predicha de 96.9% con una capacidad predictiva R^2 de 93.8%.
- De acuerdo al segundo objetivo específico se ha desarrollado un modelo de red neuronal artificial para predecir la trabajabilidad del concreto ligero con esferas de poliestireno expandido modificado (MEPS), este modelo es el RNA_S_B obteniendo un valor de correlación muy alta entre la trabajabilidad real y la trabajabilidad predicha de 87.9% con una capacidad predictiva R^2 de 77.3%.
- De acuerdo al tercer objetivo específico se ha establecido la arquitectura de red neuronal artificial más eficaz para la predicción de la resistencia a compresión y trabajabilidad en concreto ligero con poliestireno expandido modificado (MEPS) Para la resistencia a compresión del concreto ligero se elaboraron 4 modelos de RNA con una arquitectura perceptrón multicapa con un tipo de conexión hacia adelante feedforward, un tipo de aprendizaje backpropagation, el número de variables de entrada de acuerdo a su incidencia en la resistencia a compresión y



una salida que vendría a ser la resistencia a la compresión. De las cuales la que presento una mejor eficacia fue el modelo RNA_FC_B [13-12-1] con 13 variables de entrada: (métodos de diseño, cemento, agregado fino, agregado grueso, agua, cantidad de MEPS, volumen de MEPS, temperatura de MEPS, peso específico de los MEPS, diámetro promedio de MEPS y edad de curado del concreto ligero), 12 neuronas en la capa oculta y una salida la predicción de la resistencia a compresión. obteniendo un error cuadrático medio MSE de 25.79.

Para la trabajabilidad del concreto ligero se elaboraron 3 modelos de RNA con una arquitectura perceptrón multicapa con un tipo de conexión hacia adelante feedforward, un tipo de aprendizaje backpropagation, el número de variables de entrada de acuerdo a su incidencia en la trabajabilidad del concreto y una salida que vendría a ser la trabajabilidad. De las cuales la que presento una mejor eficacia fue el modelo RNA_S_B [9-8-1] con 9 variables de entrada: (cemento, agregado fino, agregado grueso, agua, cantidad de MEPS, volumen de MEPS, temperatura de MEPS, peso específico de los MEPS, diámetro promedio de MEPS), 8 neuronas en la capa oculta y una salida la predicción de la trabajabilidad. obteniendo un error cuadrático medio MSE de 0.157.

- De acuerdo al cuarto objetivo específico se ha logrado reducir costos y tiempos en la obtención de la resistencia a la compresión del concreto ligero MEPS mediante el uso de redes neuronales artificiales en comparación a los métodos tradicionales, respecto a los costos se ha visto una reducción respecto a los ensayos de compresión simple ahorrando el 100% del costo, a su vez también en el ahorro de materiales. Respecto al tiempo se ha visto una reducción considerable del tiempo en la obtención de resultados (aproximadamente 10min) respecto al tiempo de curado del concreto (7, 14 28 días).



VI. RECOMENDACIONES

- Se recomienda diseñar modelos de redes neuronales para la predicción de otras propiedades como son la resistencia a la flexión y módulo de elasticidad para un concreto ligero con MEPS.
- Se sugiere el estudio de otras variables de diseño para mejorar el manejo de parámetros que afecten la resistencia a la compresión y trabajabilidad del concreto con MEPS.
- Se recomienda en el campo de la ingeniería civil con el uso de nuevas tecnologías como son el uso de redes neuronales artificiales para tomar decisiones en reemplazo de métodos tradicionales.
- Se recomienda aumentar el registro de ensayos con el fin de obtener mejor precisión logrando una mejor eficacia.
- Se recomienda realizar ajustes a la red neuronal con el fin de alcanzar mejores niveles de precisión tomando datos de registros de ensayos de probetas.
- Se recomienda el uso de redes neurales en otro tipo de concretos para ver la efectividad de predicción con otros concretos.



VII. REFERENCIAS

- Abanto Castillo, F. (2009). *Tecnología del Concreto (Teoría y problemas)* (2ª ed). San Marcos.
- ACI-Comité 211. (2014). *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*. American Concrete Institute.
- Acuña, L., Torre, A. V., Moromi, I., & García, F. (2014). Uso de las redes neuronales artificiales en el modelado del ensayo de resistencia a compresión de concreto de construcción según la norma ASTM C39/C 39M. *Informacion Tecnologica*, 25(4), 3–12. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642014000400002>
- Alegre López, A., Mariño, S., & La Red, D. (2003). Simulación de Redes Neuronales Artificiales : Una Herramienta para la Docencia en Castellano. *Dpto. Informática Universidad Nacional Del Nordeste Corrientes Argentina*, 2–13. <https://disi.unal.edu.co/~lctorress/RedNeu/LiRna002.pdf>
- Álvarez Palacios, G., & Saez Bravo, E. (2012). *Hormigón Ligero* (1ª ed). Running Produccion S.A. <https://doi.org/10.5821/pl.v0i6.1268>
- ANAPE. (2015). *anape - Asociación Nacional de Poliestireno Expandido*. <http://www.anape.es/index.php?accion=producto>
- ASTM C127. (n.d.). *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate. Método de prueba estándar para densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción de agregado grueso*.
- ASTM C128. (n.d.). *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate. Método de prueba estándar para densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción de agregado fino*.
- ASTM C136/C136M-19. (n.d.). *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. Método de prueba estándar para análisis de tamiz de agregados*



finos y gruesos.

ASTM C143 / C143M. (n.d.). *Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete. Método de prueba estándar para el asentamiento del concreto.*

ASTM C29/C29M-17a. (n.d.). *Standard Test Method for Bulk Density (Unit Weight) and Voids in Aggregate. Método de prueba estándar para densidad aparente (Peso unitario) y vacíos en agregados.*

ASTM C31/C31M. (n.d.). *Standard Test Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens. Práctica de prueba estándar para fabricar y curar especímenes de prueba de concreto en el campo.*

ASTM C39 / C39M. (n.d.). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. Método de prueba estándar para la resistencia a la compresión de muestras cilíndricas de hormigón.*

ASTM C566-19. (n.d.). *Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying. Método de prueba estándar para el contenido total de humedad del agregado.*

ASTM C642. (n.d.). *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. Método de prueba estándar para densidad, absorción y vacíos en concreto endurecido.*

ASTM D75 / D75M. (n.d.). *Standard Practice for Sampling Aggregates. Procedimiento normalizado para el muestreo de agregados.*

Barría Sandoval, P. A. (2010). *Pronóstico de caudales medios mensuales en las cuencas de los ríos Baker y Pascua* [Tesis de Grado, Universidad de Chile].
<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104008>

Borrás, F. O. (2010). *Aplicación del hormigón postensado en edificación*. [Tesis de Mestría, Universidad Politécnica de Valencia].



- Carrión Sánchez, J. L. (2013). *Generación de una malla de ondulaciones geoidales por el método GPS/nivelación y Redes Neuronales Artificiales a partir de datos dispersos* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de la Plata, Argentina].
<http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/29002>
- Chen, B., & Liu, J. (2004). Properties of lightweight expanded polystyrene concrete reinforced with steel fiber. *Cement and Concrete Research*, 34(7), 1259–1263.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.12.014>
- Collantes Duarte, J. V. (2001). *Predicción con redes neuronales artificiales: Comparación con las metodologías de box y jenkins* [Tesis de Grado, Universidad de los Andes, Venezuela].
http://bdigital.ula.ve/storage/pdftesis/postgrado/tde_arquivos/16/TDE-2007-01-24T06:11:45Z-25/Publico/Joanna Collantes.pdf
- Comité ACI 318. (2019). *Requisitos del código de construcción para hormigón estructural (ACI 318-19)*. American Concrete Institute.
https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=318U19&Language=English&Units=US_Units
- Construcción-eps. (2007). *Fabricación del Poliestireno Expandible*.
https://www.construccion-eps.com/descargas/producto/proceso_de_fabricacion_del_poliestireno_expandible.pdf
- Cox, L. A., & Popken, D. A. (2002). A hybrid system-identification method for forecasting telecommunications product demands. *International Journal of Forecasting*, 18(4), 647–671.
https://www.researchgate.net/publication/222315571_A_hybrid_system-identification_method_for_forecasting_telecommunications_product_demands



- [Concreto Ligero]. (n.d.). [*Concreto Ligero*]. Biblioteca Digital de la Universidad Sonora de México. <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/2702/Capitulo1.pdf>
- Deepak, M., Gopalan, A., Akshay Raj, R., Shanmugi, S., & Usha, P. (2019). Modeling of concrete slump and compressive strength using ANN. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 8(5s), 497–503. <https://www.ijitee.org/wp-content/uploads/papers/v8i5s/ES3471018319.pdf>
- Díaz Tello, M. H. (2017). *Uso de las redes neuronales artificiales en el modelado del ensayo de resistencia a compresión de concreto de construcción según la norma ASTM C39/C 39M* [Tesis de Grado, Universidad Nacional de Cajamarca, Perú (p-103)]. <http://repositorio.unc.edu.pe/handle/UNC/1020>
- Gonzales Gaspar, C. J. (2018). *Análisis de la resistencia del concreto mediante redes neuronales haciendo uso del agregado de la cantera Santa Rosa Huancavelica* [Tesis de Grado, Universidad Nacional de Huancavelica, Perú]. <http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/2127>
- González-Salcedo, L. O., Guerrero Zúñiga, A. P., Delvasto-arjona, S., & Ernesto Will, A. L. (2017). Redes neuronales artificiales para estimar propiedades en estado fresco y endurecido, para hormigones reforzados con fibras metálicas. *Cuaderno Activa*, 9(1), 95–107. <https://ojs.tdea.edu.co/index.php/cuadernoactiva/article/view/423/495>
- González Salcedo, L. O., Guerrero Zúñiga, A. P., Delvasto Arjona, S., & Ernesto Will, A. L. (2012, June). Exploración con redes neuronales artificiales para estimar la resistencia a la compresión, en concretos fibroreforzados con acero. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 22(1), 19–41. <https://doi.org/10.18359/rcin.247>
- Gutiérrez de López, L. (2003). *El concreto y otros materiales para la Construcción* (2^a ed). Centro de publicaciones. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/9302>
- Gutiérrez Pulido, H., & De la Vara Salazar, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*



- (2^a ed). Mc Graw Hill Interamericana.
- Haykin, S. (2005). *Neural Networks A Comprehensive Foundation* (2^a ed). Pearson Prentice Hall.
- Heredia Cisterna, E. A., & Pérez Pérez, J. S. (2018). *Análisis y evaluación del concreto ligero como concreto estructural usando como adición controlada poliestireno expandido modificado (MEPS) aplicado a una losa unidireccional para fines habitacionales* [Tesis de Grado, Universidad Nacional del Santa, Perú].
<http://repositorio.uns.edu.pe/handle/UNS/3174>
- Hernández López, L. (2006). *Predicción y optimización de emisores y consumo mediante redes neuronales rn motores diesel* (1^a ed). Editorial Reverte S.A.
- Hernández Sampieri, R. (2014). *Metodología de la Investigación* (6^a ed). Mc Graw Hill Education.
- Hilera, J. R., & Martínez, V. (1995). *Redes neuronales artificiales: Fundamentos, modelos y aplicaciones* (1^a ed). RA-MA Editorial.
https://www.researchgate.net/publication/44343683_Redес_neuronales_artificiales_fundamentos_modelos_y_aplicaciones_Jose_Ramon_Hilera_Gonzalez_Victor_Jose_Martinez_Hernando
- Kan, A., & Demirboğa, R. (2008). A new technique of processing for waste-expanded polystyrene foams as aggregates. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(6), 2994–3000.
https://www.researchgate.net/publication/223468931_A_new_technique_of_processing_for_waste-expanded_polystyrene_foams_as_aggregates
- Lamond, J. F., & Pielert, J. H. (2006). *Significance Of Test And Properties Of Concrete & Concrete Making - Materials* (5^a ed). ASTM 169D.
[https://doi.org/10.1016/S0080-8784\(01\)80194-0](https://doi.org/10.1016/S0080-8784(01)80194-0)



- Machaca Apaza, L. C. (2016). *Estimación de la evapotranspiración de referencia utilizando modelos de redes neuronales artificiales en función de elementos climáticos en la cuenca del río Huancané* [Tesis de Grado, Universidad Nacional del Altiplano, Perú]. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/4612>
- MathWorks. (2022a). *Retropropagación de Levenberg-Marquardt - MATLAB trainlm*. <https://www.mathworks.com/help/deeplearning/ref/trainlm.html>
- MathWorks. (2022b). *Retropropagación de regularización bayesiana - MATLAB trainbr*. <https://www.mathworks.com/help/deeplearning/ref/trainbr.html;jsessionid=7e9a03b647ffb9de1cef004e66da>
- Mendenhall, W., Beaver, B., & Beaver, R. (2010). *Introducción a la probabilidad y estadística* (13^a ed). CENGAGE Learning.
- Neville, A. (2010). *Targeted/emerging therapies for metastatic non-small cell lung cancer* (2^a ed, Vol. 13). Pearson Education Limited. <https://doi.org/10.6004/jnccn.2015.0201>
- Norma Técnica E.060. (2017). *Norma Técnica de Edificación E.060 Concreto Armado*. Lima, Perú. http://www.vivienda.gob.pe/dnc/archivos/Estudios_Normalizacion/Normalizacion/normas/E060_CONCRETO_ARMADO
- NTP 334.001. (2011). *Cementos: Definiciones y nomenclatura* (3^a ed). INDECOPI.
- NTP 339.088. (2006). *Agua de mezcla utilizada en la producción de concreto de cemento Portland*. (2^a ed). Comisión de Reglamentos Técnicos y comerciales - INDECOPI.
- NTP 400.011. (2008). *Definición y clasificación de agregados para uso en morteros y hormigones (concretos)* (2^a ed). INDECOPI.
- NTP 400.012. (2001). *Análisis granulométrico del agregado fino, grueso y global* (3^a ed). INDECOPI.



- NTP 400.037. (2014). *Especificaciones normalizadas para agregados en concreto* (3^a ed). INDECOPI.
- Pasquel Carbajal, E. (1998). *Temas de tecnología del concreto en el Perú* (2^a ed). Colegio de Ingenieros del Perú - Consejo departamental de Lima.
- Pino Diez, R., Abajo Martínez, N. de., & Gómez Gómez, A. (2001). *Introducción a la inteligencia artificial: Sistemas expertos, redes neuronales artificiales y computación evolutiva* (1^a ed). Servicio de Publicaciones.
- Ponce Cruz, P. (2010). *Inteligencia Artificial con Aplicaciones a la Ingeniería* (1^a ed). Alfaomega.
- Rivva López, E. (2000). *Naturaleza y Materiales del Concreto* (1^a ed). Capítulo Peruano ACI.
- Rodríguez Chico, H. E. (2017). *Concreto liviano a base de poliestireno expandido para la prefabricación de unidades de albañilería no estructural - Cajamarca* [Tesis de Grado, Universidad Nacional de Cajamarca, Perú].
<http://repositorio.unc.edu.pe/handle/UNC/999>
- Ruiz, R. (2006). *Historia y evolución del pensamiento científico* (1^a ed). México.
- Sadrumontazi, A., Sobhani, J., Mirgozar, M. A., & Najimi, M. (2012). Properties of multi-strength grade EPS concrete containing silica fume and rice husk ash. *Construction and Building Materials*, 35, 211–219.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061812001262>
- Sayadi, A. A., Tapia, J. V., Neitzert, T. R., & Clifton, G. C. (2016, June). Effects of expanded polystyrene (EPS) particles on fire resistance, thermal conductivity and compressive strength of foamed concrete. *Construction and Building Materials*, 112, 716–724. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.218>
- Silva Vanegas, J. S., & Zapata Cortés, D. G. (2020). *Propuesta metodológica para*



- predecir la resistencia a la compresión de un cilindro de concreto de acuerdo con la norma del sector de la construcción mediante el uso de las TIC* [Tesis de Grado, Universidad de Santo Tomás, Colombia]. <http://hdl.handle.net/11634/28567>
- Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, W. C. (2008). *Institute for Water Education, Delft, Material of the 3. International course of Ecological Sanitation (April to July 2008) coordinated by Elizabeth von Münch.*
- Tengku Fitriani, S. (2006). Lightweight high strength concrete with expanded polystyrene beads. *Mektek*, 7(1), 9–15.
<http://jurnal.untad.ac.id/jurnal/index.php/Mektek/article/view/396>
- Torre, A. (2004). *Curso básico de tecnología del concreto* (1ª ed). Universidad Nacional de Ingeniería.
- Vega More, J. J. (2019). *Modelamiento computacional de la resistencia a compresión y trabajabilidad del concreto ligero con esferas de poliestireno expandido* [Tesis de Grado, Universidad Nacional de Ingeniería, Perú].
<http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/18207>