Evaluación comparativa del método de optimización de la Curva de la Tarántula vs métodos de optimización de Fuller, Mínimos cuadrados y Shilstone en un diseño de mezcla de concreto normal de 21 MPa.

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Autores
Aldair Rikker Vanegas Ramírez
Cristian Alberto Melo Torres

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
Facultad Tecnológica
Ingeniería Civil

Bogotá D.C. Abril, 2022

Evaluación comparativa del método de optimización de la Curva de la Tarántula vs métodos de optimización de Fuller, Mínimos cuadrados y Shilstone en un diseño de mezcla de concreto normal de 21 MPa.

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Autores
Aldair Rikker Vanegas Ramirez
CÓDIGO: 20172579029
Cristian Alberto Melo Torres
CÓDIGO: 20171579013

Modalidad
(Monografía/Investigación)

Presentado para optar al título de: Ingenieros Civiles

Director
Milton Mena Serna

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
Facultad Tecnológica
Ingeniería Civil

Bogotá D.C. Abril, 2022.

Tabla de contenido

1. INTRODUCCIÓN 13
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 14
3. JUSTIFICACIÓN 15
4. OBJETIVOS 16
   4.1. Objetivo General 16
   4.2. Objetivos específicos 16
5. INTERROGANTE O HIPÓTESIS 16
6. MARCO DE REFERENCIA 16
   6.1. Marco de Antecedentes 16
   6.2. Marco conceptual 18
   6.2.1. Concreto 18
   6.2.2. Diseño de Mezcla 18
   6.2.3. Cemento portland 18
   6.2.4. Agregado 19
   6.2.5. Agregado grueso – fracción gruesa 19
   6.2.6. Agua Para El Concreto 19
   6.2.7. Granulometría. 20
   6.2.8. Granulometría Combinada 20
   6.2.9. Propiedades Del Concreto 20
   6.2.10. DISEÑO DE MEZCLA PARA UN CONCRETO DE 21 MPA CON AGREGADOS DE PESO NORMAL 21
   6.2.11. OPTIMIZACIÓN GRANULOMETRICA DE LA CANTIDAD DE AGREGADOS A UTILIZAR EN EL DISEÑO DE MEZCLA 25
   6.3. Marco Histórico 39
   6.4. Marco Normativo. 41
7. DISEÑO METODOLÓGICO 41
   7.1. Tipo De Investigación 41
   7.2. Población 41
   7.3. Muestra 41
   7.4. Variables 42
   7.5. Alcance 42
8. DISEÑO EXPERIMENTAL 42
   8.1. Elección De Los Factores, Niveles Y Rangos Ideales. 42
   8.2. Factores de diseño 42
   8.3. Factores que permanecen constantes 43
   8.4. Factores perturbadores 44
   8.5. SELECCIÓN DE LA VARIABLE DE RESPUESTA. 44
   8.6. Elección De Los diseños Y Tamaño de la Muestra 44
9. PRACTICA EXPERIMENTAL 47
   9.1. Obtención y Características de los Materiales del Diseño 47
   9.2. La cantidad de material a utilizar en los ensayos 48
   9.3. Caracterización de las propiedades mineralógicas de los materiales 48
   9.4. Diseños de mezcla 48
   9.5. Fabricación del concreto de prueba 49
   9.6. Reconocimiento de las características generales de los diferentes diseños de mezcla 49

10. DISEÑO DE MEZCLA....49
10.1. SELECCIÓN DE LA RESISTENCIA DE DISEÑO....50
10.2. ASENTAMIENTO Y USO DEL CONCRETO....50
10.3. SELECCIÓN DEL TAMAÑO MÁXIMO Y TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL....51
10.4. ELECCIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA....52
10.5. ESTIMACIÓN APROXIMADA DE LA RELACIÓN A/C....52
10.6. ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE CEMENTO....53
10.7. DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN DE AGREGADOS PRESENTES EN 1 M3 DE CONCRETO....53
10.8. Granulometría de los Materiales....54
10.8.1. Granulometría de la Grava....54
10.8.2. Granulometría de la Gravilla....55
10.8.3. Granulometría de la Arena....56
10.9. PRINCIPIOS DE OPTIMIZACION....57
10.9.1. PRINCIPIO DE OPTIMIZACIÓN POR FULLER....58
10.9.1.1. Método Fuller por tanteo....58
10.9.1.2. Método Fuller por módulos de finura....59
10.9.2 PRINCIPIO DE OPTIMIZACIÓN POR MÍNIMOS CUADRADOS....63
10.9.3. PRINCIPIO DE OPTIMIZACIÓN POR SHILSTONE....68
10.9.4. PRINCIPIO DE OPTIMIZACIÓN POR CURVA DE LA TARANTULA....74
10.10. RESUMEN DE CANTIDADES REQUERIDAS EN EL DISEÑO DE MEZCLA CONCRETO....77
11. ELABORACION Y CURADO DE ESPECIMENES CILÍNDRICOS DE CONCRETO NORMAL....78
11.1. MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS....78
11.2. PROCEDIMIENTO GENERAL....78
11.3. ENSAYO DE ASENTAMIENTO DEL CONCRETO (CONO DE ABRAMS)....83
OBJETIVOS....83
MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS....83
12. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS DE CONCRETO....84
OBJETIVOS....84
MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS....84
12.1. PROCEDIMIENTO GENERAL DEL ENSAYO....84
12.2. RESULTADOS OBTENIDOS....85
12.3. ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN CONCRETO NORMAL (7 DÍAS) 86
12.4. RESULTADOS OBTENIDOS A LOS 7 DIAS....87
12.5. RESULTADOS OBTENIDOS A LOS 28 DIAS....90
13. INTERPRETACION DE RESULTADOS....92
13.1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO....92
13.1.1. DESARROLLO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN....92
13.1.2. CALCULO DE PARAMETROS ESTADISTICOS TIPICOS....92
13.1.2.1. Promedio....92
13.1.2.2. Varianza....92
13.1.2.3. Desviación Estándar....93
13.1.2.4. Coeficiente De Variación, V....93
13.2. COMPROBACIÓN DE NORMALIDAD DE DISEÑOS DE MEZCLA....93

13.2.1. COMPROBACIÓN DE NORMALIDAD DEL METODO DE FULLER, PARA UN RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 7 DÍAS 93
13.2.2. COMPROBACIÓN DE NORMALIDAD DEL METODO DE CURVA DE LA TARÁNTULA, RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 7 DÍAS 95
13.2.3. COMPROBACIÓN DE NORMALIDAD DEL METODO DE MÍNIMOS CUADRADOS, RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 7 DÍAS 97
13.2.4. COMPROBACIÓN DE NORMALIDAD DEL METODO DE SHILSTONE, RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 7 DÍAS 99
13.2.5. COMPROBACIÓN DE NORMALIDAD DEL METODO DE FULLER, RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 28 DÍAS 101
13.2.6. COMPROBACIÓN DE NORMALIDAD DEL METODO DE CURVA DE LA TARÁNTULA, RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 28 DÍAS 103
13.2.7. COMPROBACIÓN DE NORMALIDAD DEL METODO DE MÍNIMOS CUADRADOS, RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 28 DÍAS 105
13.2.8. COMPROBACIÓN DE NORMALIDAD DEL METODO DE SHILSTONE, RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 28 DÍAS 107
13.3. PRUEBA DE NORMALIDAD DE KOLMOGOROV-SMIRNOV 109
13.3.1. PRUEBA DE NORMALIDAD DE KOLMOGOROV-SMIRNOV DISEÑO DE MEZCLA USANDO METODO DE FULLER, RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 7 DÍAS 110
13.3.2. PRUEBA DE NORMALIDAD DE KOLMOGOROV-SMIRNOV DISEÑO DE MEZCLA USANDO METODO DE CURVA DE LA TARANTULA, RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 7 DÍAS 111
13.2.3. PRUEBA DE NORMALIDAD DE KOLMOGOROV-SMIRNOV DISEÑO DE MEZCLA USANDO METODO DE MÍNIMOS CUADRADOS, RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 7 DÍAS 112
13.2.4. PRUEBA DE NORMALIDAD DE KOLMOGOROV-SMIRNOV DISEÑO DE MEZCLA USANDO METODO DE SHILSTONE, RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 7 DÍAS 112
13.2.5. PRUEBA DE NORMALIDAD DE KOLMOGOROV-SMIRNOV DISEÑO DE MEZCLA USANDO METODO DE FULLER, RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 28 DÍAS 113
13.2.6. PRUEBA DE NORMALIDAD DE KOLMOGOROV-SMIRNOV DISEÑO DE MEZCLA USANDO METODO DE CURVA DE LA TARANTULA, RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 28 DÍAS 114
13.2.7. PRUEBA DE NORMALIDAD DE KOLMOGOROV-SMIRNOV DISEÑO DE MEZCLA USANDO METODO DE MÍNIMOS CUADRADOS, RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 28 DÍAS 115
13.2.8. PRUEBA DE NORMALIDAD DE KOLMOGOROV-SMIRNOV DISEÑO DE MEZCLA USANDO METODO DE SHILSTONE, RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 28 DÍAS 117
13.3. NIVEL DE CONFIABILIDAD DEL MUESTREO 118
13.3.1. NIVEL DE CONFIABILIDAD NORMAL ENSAYO A LA COMPRESIÓN A LOS 7 DÍAS MÉTODO DE FULLER 118
13.3.3. NIVEL DE CONFIABILIDAD NORMAL ENSAYO A LA COMPRESIÓN A LOS 7 DÍAS MÉTODO DE CURVA DE LA TARÁNTULA 119
13.3.3. NIVEL DE CONFIABILIDAD NORMAL ENSAYO A LA COMPRESIÓN A LOS 7 DÍAS MÉTODO DE MÍNIMOS CUADRADOS 119

13.3.4. NIVEL DE CONFIABILIDAD NORMAL ENSAYO A LA COMPRESIÓN A LOS 7 DÍAS MÉTODO DE MÍNIMOS SHILSTONE 120
13.3.5. NIVEL DE CONFIABILIDAD NORMAL ENSAYO A LA COMPRESIÓN A LOS 28 DÍAS MÉTODO DE FULLER 120
13.3.6. NIVEL DE CONFIABILIDAD NORMAL ENSAYO A LA COMPRESIÓN A LOS 28 DÍAS MÉTODO DE CURVA DE LA TARÁNTULA 121
13.3.7. NIVEL DE CONFIABILIDAD NORMAL ENSAYO A LA COMPRESIÓN A LOS 7 DÍAS MÉTODO DE MÍNIMOS CUADRADOS.....121
13.3.8. NIVEL DE CONFIABILIDAD NORMAL ENSAYO A LA COMPRESIÓN A LOS 7 DÍAS MÉTODO DE MÍNIMOS SHILSTONE 122
13.4. PRUEBA DE MEDIAS Y VARIANZAS, ANÁLISIS ANOVA.....122
13.4.1. ANÁLISIS ANOVA DISEÑOS DE MEZCLA DE FULLER, CURVA DE LA TARÁNTULA, MÍNIMOS CUADRADOS Y SHILSTONE A LOS 7 DÍAS 123
13.4.2. ANÁLISIS ANOVA DISEÑOS DE MEZCLA DE FULLER, CURVA DE LA TARÁNTULA, MÍNIMOS CUADRADOS Y SHILSTONE A LOS 28 DÍAS 125
13.5. CURVA DE RESISTENCIA A LA COMPRESION (fc) VS TIEMPO (t).....128
13.5.1. RESISTENCIA VS TIEMPO MÉTODO DE FULLER 128
13.5.2. RESISTENCIA VS TIEMPO MÉTODO DE CURVA DE LA TARANTULA .129
13.5.3. RESISTENCIA VS TIEMPO MÉTODO DE MÍNIMOS CUADRADOS 130
13.5.4. RESISTENCIA VS TIEMPO MÉTODO DE SHILSTONE.....131
13.5.5. RESISTENCIA VS TIEMPO DISEÑOS DE MEZCLA DE LOS 4 METODOS, FULLER, CURVA DE LA TARÁNTULA, MÍNIMOS CUADRADOS Y SHILSTONE....132
13.6. CONTROL DE CALIDAD DEL CONCRETO.....133
13.7. CARTAS DE CONTROL DE CALIDAD DEL CONCRETO.....135
13.7.1. CARTA DE CONTROL DE CALIDAD PARA DISEÑO DE MEZCLA USANDO MÉTODO DE FULLER 136
13.7.2. CARTA DE CONTROL DE CALIDAD PARA DISEÑO DE MEZCLA USANDO MÉTODO DE FULLER 136
13.7.3. CARTA DE CONTROL DE CALIDAD PARA DISEÑO DE MEZCLA USANDO MÉTODO DE FULLER 137
13.7.4. CARTA DE CONTROL DE CALIDAD PARA DISEÑO DE MEZCLA USANDO MÉTODO DE FULLER 137
13.8. ANALISIS DE RESISTENCIA VS TRABAJABILIDAD.....138
13.8.1. RESULTADOS OBTENIDOS.....139
13.8.2. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS 139
14. CONCLUSIONES.....141
15. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....143

TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Volumen de agregado grueso por metro cúbico de concreto 22
Ilustración 2 Valores de asentamiento recomendados para diversas clases de construcción 22
Ilustración 3 Valores recomendados de TMN según el tipo de construcción 23
Ilustración 4 Valores recomendados para el contenido de aire en el concreto para varios grados de exposición 23
Ilustración 5 Requerimientos aproximados de agua de mezclado 24
Ilustración 6 Curvas de requerimientos de agua de mezclado 24
Ilustración 7 Relación entre la resistencia a la compresión y algunos valores de la relación a/c 25
Ilustración 8 Granulometría de Fuller y Thompson según el tamaño máximo nominal 26
Ilustración 9 Dosificación grafica de agregados mediante metodología Fuller 27
Ilustración 10 ecuaciones para planteamiento del problema29
Ilustración 11 ecuación matricial método de mínimos cuadrados 30
Ilustración 12 Matrices ampliadas A 30
Ilustración 13 Matrices ampliadas x, c y r 30
Ilustración 14 sistema de ecuaciones lineales final 31
Ilustración 15 carta Shilstone de factor grueso y trabajabilidad 32
Ilustración 16 sectorización zonda 2 gráfico de Sinsonte 34
Ilustración 17 gradación individual que se integra como una sola combinación gradación 35
Ilustración 18 es el porcentaje individual retenido en cada número de tamiz 36
Ilustración 19 Descripción límites de la “curva de la tarántula 36
Ilustración 20 Causas de variación de resistencia 43
Ilustración 21 Mapa de ubicación lugar de extracción de agregados 47
Ilustración 22 Diagrama Durabilidad, Resistencia, Manejabilidad, parámetros que dependen de la relación a/c de cualquier concreto estructural. 49
Ilustración 23 asentamientos recomendados según consistencia de la mezcla 51
Ilustración 24 Requerimiento aproximado de agua de mezclado para diferentes asentamientos y tamaños máximos de agregado con partículas de forma angular y textura rugosa 52
Ilustración 25 Relación Agua cemento según la resistencia ultima a la compresión 53
Ilustración 26 Curva granulométrica grava 55
Ilustración 27 Curva Granulométrica gravilla 56
Ilustración 28 Curva Granulométrica arena 57
Ilustración 29 Valores de materiales que permanecen constantes en el diseño de mezcla 57
Ilustración 30 Análisis Granulométrico por método de Fuller para tres tipos de agregados 58
Ilustración 31 Método de Fuller por tanteos para los tres agregados del diseño de mezcla 59
Ilustración 32 Gráfico de porcentaje retenido en cada una de las mallas 69
Ilustración 33 Carta de Factor Trabajabilidad y Grosor 71
Ilustración 34 Gráfico de porcentaje retenido en cada una de las mallas para el método de la curva de la tarántula 74

Ilustración 35 Instrumentos requeridos para la fundición de probetas cilíndricas de concreto.....78
Ilustración 36 Herramienta menor necesaria para la fundición de muestras de concreto. 78
Ilustración 37 Selección de material pétreo de tamaño 1”.....79
Ilustración 38 Selección de material pétreo de tamaño 1/2”.....79
Ilustración 39 Selección de material fino tamiz pasa 200.....79
Ilustración 40 Pesaje del material para muestras 79
Ilustración 41 Dosificación de grava para muestras.....79
Ilustración 42 Dosificación de arena para muestras.....79
Ilustración 43 Mezcla manual Ilustración 44 elección Ilustración 45 Lubricación de camisas plásticas de material pétreo de tamaño ½” 80
Ilustración 46 Aplicación de agua a la mezcla.....80
Ilustración 47 Premezclado manual antes del mecánico.....80
Ilustración 48 Mezcla final mediante uso del trompo.....80
Ilustración 49 Aplicación de 25 golpes con la varilla 81
Ilustración 50 Enrase de las muestras en estado fresco 81
Ilustración 51 Aplicación de golpes con martillo de goma.....81
Ilustración 52 Almacenamiento muestral antes de desencofrar 81
Ilustración 53 Almacenamiento muestral antes de desencofrar.....81
Ilustración 54 Almacenamiento muestral antes de desencofrar 81
Ilustración 55 desencofrada de muestras 1 día después de fundidas.....82
Ilustración 56 Uso de pistola de compresión para desencofrada de muestras.....82
Ilustración 57 Introducción de aire por el agujero de paso de aire.....82
Ilustración 58 Curado de muestras una vez desencofradas 82
Ilustración 59 Sumergimiento de muestras con cal añadida.....82
Ilustración 60 Almacenamiento de muestras en ambiente sumergido 82
Ilustración 61 Cono de Abrams y varilla metálica 83
Ilustración 62 25 golpes.....83
Ilustración 63 retiro del molde troncocónico.....83
Ilustración 64 Esquema de patrones típicos de falla. 86
Ilustración 65 Cilindro de concreto - distribución de carga uniforme sobre el área circular 87
Ilustración 66 Máquina para fallar cilindros aplica una carga constante a velocidad uniforme. 87
Ilustración 67 Cilindros de concreto dispuestos para ensayo de resistencia a compresión.....87
Ilustración 68 Cilindros de concreto dispuestos para ensayo de resistencia a compresión.....87
Ilustración 69 Curva de distribución normal, diseño de mezcla para el método de Fuller 94
Ilustración 70 Curva de distribución normal, diseño de mezcla usando método de Curva de la tarántula.....96
Ilustración 71 Curva de distribución normal, diseño de mezcla usando método de Mínimos cuadrados.....98
Ilustración 72 Curva de distribución normal, diseño de mezcla usando método de Shilstone 100
Ilustración 73 Curva de distribución normal, diseño de mezcla usando método de Fuller 102

Ilustración 74 Curva de distribución normal, diseño de mezcla usando método de Curva de la TarántulaTomado de: Elaboración Propia.....104
Ilustración 75 Curva de distribución normal, diseño de mezcla usando método de Mínimos cuadrados *Tomado de: Elaboración Propia*.....106
Ilustración 76 Curva de distribución normal, diseño de mezcla usando método de Shilstone 108
Ilustración 77 Gráfico desarrollo de resistencia método de FullerTomado de: Elaboración Propia.....128
Ilustración 78 Gráfico desarrollo de resistencia método de Curva de la tarántula 129
Ilustración 79 Gráfico desarrollo de resistencia método de Mínimos cuadrados.....130
Ilustración 80 Gráfico desarrollo de resistencia método de Shilstone 131
Ilustración 81 Gráfico desarrollo de resistencia diseños de mezcla, Fuller, curva de la tarántula 132
Ilustración 82 Carta de control de calidad para diseño de mezcla usando método de Fuller.....136
Ilustración 83 Carta de control de calidad para diseño de mezcla usando método de Fuller.....136
Ilustración 84 Carta de control de calidad para diseño de mezcla usando método de Fuller.....137
Ilustración 85 Carta de control de calidad para diseño de mezcla usando método de Fuller.....137
Ilustración 86 Implementos utilizados en prueba de trabajabilidad.....138
Ilustración 87 Ilustración 87 Colocación de varilla y medida de asentamiento.....138

TABLA DE TABLAS

Tabla 1 Contenido de cemento según el tipo de aplicación.....38
Tabla 2 Análisis teórico de las metodologías.....39
Tabla 3 Nivel de confianza 45
Tabla 4 Cantidad de probetas a ensayar 46
Tabla 5 Cantidad de material requerida para 120 muestras.....48
Tabla 6 Resistencia promedio a la compresión requerida cunado no hay datos disponibles para establecer una desviación estándar de la muestra 50
Tabla 7 Parámetros de diseño de mezcla.....52
Tabla 8 Resumen de materiales para el diseño inicial estimado 54
Tabla 9 Granulometría grava.....54
Tabla 10 Granulometría gravilla.....55
Tabla 11 Granulometría Arena.....56
Tabla 12 Porcentajes pasa ideales teoría de Fuller y módulos de finura de Fuller para cada tamiz.....60
Tabla 13 Valores en peso y volumen para el método de Fuller mediante el uso de módulos de finura y el uso de tanteo 61
Tabla 14 Cantidades utilizadas en el diseño de mezcla para 1 m3 de concreto (agregados en estado húmedo).....62
Tabla 15 Análisis Granulométrico por método de mínimos cuadrados.....63
Tabla 16 Sistema de ecuaciones.....64

Tabla 17 resultado de operaciones mínimos cuadrados 64
Tabla 18 Coeficientes intermedios para obtener los porcentajes de agregado requeridos 65
Tabla 19 Valores calculados de porcentaje de agregados.....66
Tabla 20 Volumen y peso de agregados por mínimos cuadrados.....67
Tabla 21 Cantidades utilizadas en el diseño de mezcla para 1 m3 de concreto (agregados en estado húmedo).....68
Tabla 22 Granulometría combinada usando carta de porcentaje retenido de Shilstone. 68
Tabla 23 Resumen de valores teóricos Del método de Shilstone.....70
Tabla 24 Proporción en porcentaje de agregados por el método de Shilstone 72
Tabla 25 Proporción en volumen y peso Shilstone.....72
Tabla 26 Cantidades utilizadas en el diseño de mezcla para 1 m3 de concreto (agregados en estado húmedo).....73
Tabla 27 Granulometría combinada para el método C. de la tarántula.....74
Tabla 28 Cantidades de material obtenidas por tanteo para el método Curva de la tarántula 75
Tabla 29 Proporción en porcentaje de agregados por el método de Curva de la tarántula 75
Tabla 30 Proporciones en volumen y peso C. de la Tarántula.....75
Tabla 31 Cantidades utilizadas en el diseño de mezcla para 1 m3 de concreto (agregados en estado húmedo).....76
Tabla 32 cantidad de materiales para la elaboración de las 30 camisas por cada método - Peso en (Kg).....77
Tabla 33 cantidad de materiales para la elaboración de las 30 camisas por cada método–volumen en Porcentaje(%).....77
Tabla 34 Tolerancias de tiempo permisibles ensayo de resistencia a compresión. 85
Tabla 35 88
Tabla 36 Desarrollo de resistencia a los 7 días para 15 probetas método de Shilstone. 88
Tabla 37 Desarrollo de resistencia a los 7 días para 15 probetas método de mínimos cuadrados.....89
Tabla 38 Desarrollo de resistencia a los 7 días para 15 probetas método de la curva de la tarántula.....89
Tabla 39 Desarrollo de resistencia a los 28 días para 15 probetas método de Fuller.90
Tabla 40 Desarrollo de resistencia a los 28 días para 15 probetas método de Shilstone. 90
Tabla 41 Desarrollo de resistencia a los 28 días para 15 probetas método de mínimos cuadrados.....91
Tabla 42 Desarrollo de resistencia a los 28 días para 15 probetas método de la curva de la tarántula.....91
Tabla 43 Parámetros estadísticos método de Fuller 7 días.....93
Tabla 44 Resultados ensayo de resistencia a la compresión a los 7 días para diseño de mezcla usando método de Fuller.....94
Tabla 45 Parámetros estadísticos curva de la tarántula 7 días.....95
Tabla 46 Resultados ensayo de resistencia a la compresión a los 7 días para diseño de mezcla usando método de Curva de la tarántula.....96
Tabla 47 Parámetros estadísticos método mínimos cuadrados 7 días.....97

Tabla 48 Resultados ensayo de resistencia a la compresión a los 7 días para diseño de mezcla usando método de Mínimos cuadrados 98
Tabla 49 Parámetros estadísticos método de Shilstone 7 días 99
Tabla 50 Resultados ensayo de resistencia a la compresión a los 7 días para diseño de mezcla usando método de Shilstone 100
Tabla 51 Parámetros estadísticos método de Fuller 101
Tabla 52 Resultados ensayo de resistencia a la compresión a los 28 días para diseño de mezcla usando método Fuller 102
Tabla 53 Parámetros estadísticos Curva de la tarántula 28 días 103
Tabla 54 Resultados ensayo de resistencia a la compresión a los 28 días para diseño de mezcla usando método Curva de la Tarántula 104
Tabla 55 Parámetros estadísticos Min. cuadrados 28 días 105
Tabla 56 Resultados ensayo de resistencia a la compresión a los 28 días para diseño de mezcla usando método Curva de la Tarántula 106
Tabla 57 Parámetros estadísticos Shilstone 28 días 107
Tabla 58 Resultados ensayo de resistencia a la compresión a los 28 días para diseño de mezcla usando método Shilstone 108
Tabla 59 Datos prueba de normalidad de Kolmogorov – Smirnov para diseño de mezcla método Fuller 7 días 110
Tabla 60 Comparación Kd o estadístico de prueba vs k critico nivel de confianza de 95% 110
Tabla 61 Datos prueba de normalidad de Kolmogorov – Smirnov para diseño de mezcla método Curva de la tarántula 7 días 111
Tabla 62 Comparación Kd o estadístico de prueba vs k critico nivel de confianza 95% 111
Tabla 63 Datos prueba de normalidad de Kolmogorov – Smirnov para diseño de mezcla método Mínimos cuadrados 7 días 112
Tabla 64 Comparación Kd o estadístico de prueba vs k critico nivel de confianza 95% 112
Tabla 65 Datos prueba de normalidad de Kolmogorov – Smirnov para diseño de mezcla método de Shilstone 7 días 113
Tabla 66 Comparación Kd o estadístico de prueba vs k critico nivel de confianza 95% 113
Tabla 67 Datos prueba de normalidad de Kolmogorov – Smirnov para diseño de mezcla método Fuller 28 días 114
Tabla 68 Comparación Kd o estadístico de prueba vs k critico nivel de confianza 95% 114
Tabla 69 Datos prueba de normalidad de Kolmogorov – Smirnov para diseño de mezcla método Curva de la tarántula 28 días 115
Tabla 70 Comparación Kd o estadístico de prueba vs k critico nivel de confianza 95% 115
Tabla 71 Datos prueba de normalidad de Kolmogorov – Smirnov para diseño de mezcla método Mínimos cuadrados 28 días 116
Tabla 72 Comparación Kd o estadístico de prueba vs k critico nivel de confianza 95% 116
Tabla 73 Datos prueba de normalidad de Kolmogorov – Smirnov para diseño de mezcla método de Shilstone 28 días 117

Tabla 74 Comparación Kd o estadístico de prueba vs k critico nivel de confianza 95% 117
Tabla 75 Resistencia en MPa a los 7 días de las 15 muestras realizadas.....123
Tabla 76 valores estadísticos para análisis ANOVA diseños de mezcla a los 7 días.123
Tabla 77 ANOVA para estadístico de prueba F 124
Tabla 78 de valores método de Tukey.....124
Tabla 79 diferencias significativas o no método de Tukey 125
Tabla 80 Resistencia en MPa a los 28 días de las 15 muestras realizadas.....125
Tabla 81 valores estadísticos para análisis ANOVA diseños de mezcla a los 28 días 126
Tabla 82 ANOVA para estadístico de prueba F 126
Tabla 83 de valores método de Tukey.....127
Tabla 84 diferencias significativas o no método de Tukey 127
Tabla 85 resistencia promedio a la compresión a diferentes edades diseño de mezcla 128
Tabla 86 resistencia promedio a la compresión a diferentes edades diseño de mezcla método de la curva de la tarántula (promedio de 15 muestras de ensayo de resistencia a la compresión) 129
Tabla 87 resistencia promedio a la compresión a diferentes edades diseño de mezcla método de Mínimos cuadrados (promedio de 15 muestras de ensayo de resistencia a la compresión).....130
Tabla 88 resistencia promedio a la compresión a diferentes edades diseño de mezcla método de Shilstone (promedio de 15 muestras de ensayo de resistencia a la compresión).....131
Tabla 89 resistencia promedio a la compresión a diferentes edades diseños de mezcla, Fuller, curva de la tarántula Mínimos cuadrados y Shilstone, (promedio de 15 muestras de ensayo de resistencia a la compresión).....132
Tabla 90 Normas para el control del concreto según desviación estándar. 133
Tabla 91 Normas para el control del concreto según coeficiente de variación. 134
Tabla 92 Variabilidad y desviación estándar a los 28 días para diseño de mezcla método de Fuller 134
Tabla 93 Variabilidad y desviación estándar a los 28 días para diseño de mezcla método de Curva de la tarántula 134
Tabla 94 Variabilidad y desviación estándar a los 28 días para diseño de mezcla método de Mínimos cuadrados 135
Tabla 95 Variabilidad y desviación estándar a los 28 días para diseño de mezcla método de Shilstone.....135
Tabla 96 Resultados ensayo de asentamiento muestras de concreto.....139
Tabla 97 Cuadro comparativo, resultados obtenidos por cada método.....140
Tabla 98 Cuadro comparativo de resultados.....140

1. INTRODUCCIÓN

Durante el transcurso de la historia especialmente en los 2 últimos siglos el concreto se ha convertido en uno de los materiales de construcción de mayor uso debido a sus propiedades y bajo costo con relación a otros que poseen cualidades similares; Como es de amplio conocimiento los agregados pétreos son componentes fundamentales de un diseño de mezcla de concreto hidráulico, puesto que sus atributos afectan no solo sus propiedades físicas sino también el costo del mismo.

Una de sus características principales es la gradación la cual está definida por la distribución de los diversos tamaños de las partículas que componen los agregados, en otras palabras, significa encontrar la cantidad de cada fracción del total de tamaños de las partículas que componen la combinación de materiales para el hormigón influyendo en la cantidad de vacíos y la trabajabilidad de la mezcla.

Debido a esto a lo largo del tiempo más específicamente desde el año 1907 se ha estudiado la optimización de la gradación de los agregados en las mezclas de concreto, en este mismo año se publica la metodología de Fuller-Thompson y desde ese momento se han generado múltiples métodos para la dosificación de agregados en las mezclas de concreto como lo son, el método de Bolomey, el método gráfico, el método de mínimos cuadrados, el método de Faury, o métodos más recientes, el método de Shilstone dado a conocer en el año 2002 y el método que se pretende aplicar en la siguiente investigación, conocido como la curva de la tarántula, surgido en la universidad estatal de Oklahoma en el año 2015, el cual tiene como objeto comprender como el tamaño y dosificación de los agregados afecta la trabajabilidad del concreto realizando 4 diferentes pruebas, 1. Prueba de asentamiento (ASTM C 143), 2. Observaciones visuales. 3. análisis granulométricos, y 4. Ensayos a la compresión, teniendo en cuenta lo anterior y debido a que el procedimiento de diseño de mezcla ACI 211 ha sido el método más enseñado académicamente además de ser el recomendado por el reglamento colombiano de construcción sismorresistente NSR 10 título C, la presente investigación pretende comparar mediante las metodologías de optimización innovadoras (curva de la tarántula) y convencionales (Fuller, mínimos cuadrados Shilstone) la gradación que brinde una mejor trabajabilidad y una óptima relación de vacíos, sin alterar las propiedades físicas de resistencia y durabilidad de las muestras.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los agregados pétreos de una mezcla de concreto representan más del 70% de su volumen interviniendo directamente en variables como la resistencia, trabajabilidad, durabilidad, apariencia entre otras, El análisis y optimización granulométrica permiten realizar una mejor caracterización de los materiales, y facilita encontrar parámetros de mejora para las propiedades físicas y mecánicas del concreto en estado fresco y endurecido.

El método de optimización granulométrica conocido como la curva de la tarántula, es un procedimiento que plantea teóricamente mejores beneficios que las metodologías de optimización de agregados convencionales ya que permite a la mezcla desarrollar una gradación ideal lo que provoca mayor adherencia entre agregados, haciendo que el concreto tenga menor cantidad de vacíos y mayor estabilidad en su estado fresco, mejorando en gran manera la resistencia ultima, la manejabilidad al momento del vaciado y aportando una textura de calidad superior en el acabado.

En el último tiempo la optimización y dosificación de las mezclas de concreto ha sido un tema ampliamente estudiado y debatido, y para este caso pese a que la trabajabilidad es una de las variables más importantes del diseño de mezclas; es evidente que los métodos de diseño de mezcla existentes en nuestro País solo contemplan normativamente la prueba de asentamiento según norma NTC 396 para calificar la variable de trabajabilidad con rangos demasiado amplios para un mismo grado de dosificación de los agregados dependiendo de su tamaño máximo y módulo de finura, el resultado en campo son mezclas que cumplen con la resistencia a compresión requerida al salir de la mezcladora pero que son poco trabajables, por este motivo se hace necesario un método que relacione directamente la trabajabilidad del hormigón con la dosificación de los agregados sin afectar las resistencia u otras de las variables antes mencionadas.

3. JUSTIFICACIÓN

Durante años las especificaciones para el diseño de una mezcla de concreto se han centrado en la relación agua / cemento (w/cm) y la resistencia a compresión final, a pesar de que la mayor parte del volumen de una mezcla de hormigón consiste en el componente árido. Por este motivo los esfuerzos para reducir los costos y mejorar la sostenibilidad de las mezclas de hormigón han empujado a los fabricantes a prestar más atención en todos los aspectos de sus mezclas de hormigón. Esto ha llevado a muchos fabricantes a especificar mezclas de hormigón con una distribución de partículas agregadas bien graduada. El Diseño de mezcla planteado intentara combinar agregados gruesos, intermedios y finos para empaquetar la mayor cantidad de tamaños de agregados disponibles en una mezcla mientras se minimiza el volumen de la pasta.

Shilstone ha sido un partidario durante mucho tiempo del concreto graduado optimizado, y afirma que estas mezclas tienen mejoras en durabilidad, fuerza y resistencia a la abrasión y la erosión. También creía que “una gradación optimizada del hormigón ayudaría a controlar la trabajabilidad, bombeabilidad y respuesta a la vibración del hormigón”. Cuando las mezclas no poseen suficiente trabajabilidad, es común aumentar el contenido de cemento y agua de la mezcla. Esta puede aumentar el costo y disminuir la sostenibilidad y durabilidad del concreto.

Ciertos métodos de optimización como el de la curva de la tarántula que se centran en la gradación de los agregados, generando mezclas de concretos con una buena trabajabilidad sin afectar variables como resistencia y relación agua cemento. Al no ser métodos de optimización muy conocidos en Colombia, se hace necesario estudiarlos a mayor profundidad puesto que podría llegar a disminuir costos en la fabricación de mezclas de concreto.

Teniendo en cuenta lo anterior, se presenta la necesidad de evaluar y comparar las granulometrías tradicionales con la de la curva de la tarántula, e investigar cómo la curva de la tarántula hace posible confirmar las ventajas que este nuevo método granulométrico posee en cuanto a la trabajabilidad y resistencia para poder hacer uso de esta nueva recomendación granulométrica.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo General

Determinar si la resistencia a la compresión, y trabajabilidad de una mezcla de concreto hidráulico normal optimizada mediante el método de la curva de la tarántula, es igual o mayor a la resistencia y trabajabilidad de las mezclas optimizadas mediante los métodos de Fuller, mínimos cuadrados y Shilstone.

4.2. Objetivos específicos

- Realizar una búsqueda del estado del arte, de los métodos de optimización granulométrica propuestos.

- Realizar un análisis comparativo entre el método de optimización de la curva de la tarántula y los métodos los métodos de Fuller, Mínimos cuadrados y Shilstone, identificando los resultados obtenidos de resistencia a la compresión y trabajabilidad de las mezclas.

- Efectuar el diseño de mezclas, aplicando los métodos de optimización propuestos, manteniendo fijos los criterios de diseño como relación agua cemento, asentamiento, volumen de agua y cemento etc.…

5. INTERROGANTE O HIPÓTESIS

Cuál es la variación de la resistencia y trabajabilidad de una mezcla de concreto optimizada mediante el método de la curva de la Tarántula en comparación con mezclas de concreto dosificada mediante métodos Fuller, Mínimos cuadrados y Shilstone.

6. MARCO DE REFERENCIA

6.1. Marco de Antecedentes

- Los estudiantes del programa de posgrado en transporte de la universidad Estatal de Oklahoma, Daniel Cook, M Tyler & Ashkan Ghaeezadeh exponen en su artículo denominado “Investigation of Optimized Graded Concrete for Oklahoma” el desarrollo de una nueva prueba de trabajabilidad para el hormigón mediante la investigación de mezclas para pavimentos deslizantes realizada mediante la creación de una prueba llamada "Prueba de caja" o “Box Test” la cual pretendía evaluar distintos métodos existentes de gradación de mezclas optimizadas, luego de encontrar algunas deficiencias en los métodos actuales hallando un nuevo conjunto de diseños recomendaciones y especificaciones que mejoran la trabajabilidad manteniendo la durabilidad y la resistencia a costo reducido y con mayor sustentabilidad, Realizado en el 2013 se demostró que la utilización de este método de diseño tiene el potencial de ahorrar al estado de Oklahoma más de $ 4 millones por costos anuales a largo plazo.
- Según el equipo de investigación del Capítulo Estudiantil del ACI de la Universidad de San Martín de Porres. En Lima Perú conformado por los estudiantes Carhuavilca Fuentes Rivera Piero, Chávez Guerrero Daniel Enrique, Guillén Aguilar Josimar Antonio

& Mendoza Corcuera Jhadir Alexander. Las propiedades de resistencia y trabajabilidad del concreto pueden variar de acuerdo con la relación A/C utilizada para su elaboración, por lo cual se generó un artículo científico donde se realizaron las pruebas de resistencia a compresión para diferentes relaciones agua/cemento aplicando los procedimientos establecidos en la norma ACI 211.1, así como también los ensayos de asentamiento norma ASTM C143. La realización de estos ensayos se dio con el interés de obtener información representativa de la resistencia y trabajabilidad de los concretos diseñados con relaciones agua/cemento de 0.7, 0.625, 0.55, 0.48 y 0.43.

- En el trabajo de pregrado de Ingeniería civil realizado por Jorge Antonio Manrique Purizaca de Universidad de Piura Perú se planteó una tesis que consiste en el estudio de una mezcla de concreto utilizado en la construcción de pilotes, fabricando un hormigón de consistencia fluida, que mantenga una baja pérdida de trabajabilidad durante cinco horas aproximadamente y que, además, resista ante la acción de fuerzas de compresión considerables, a partir de la variación en la dosificación de aditivos superplastificante y retardante de fragua. Con tal fin, se calculó el peso unitario, gravedad específica, absorción y humedad total de los agregados. A partir de este análisis, se llevó a cabo la elaboración de cuatro diseños de mezcla. En el primero, no se dosificó ningún tipo de aditivo; en el segundo, sólo se incorporó un superplastificante; mientras que, en el tercero y cuarto, se añadió un superplastificante junto con un retardante de fragua en cantidades distintas para cada diseño. Finalmente, se evaluó la trabajabilidad y la resistencia a la compresión en cada una de las mezclas. Adicionalmente, la obtención de la temperatura y del peso unitario de cada mezcla, permitió tener una noción de cómo estos parámetros influyen en la fluidez del material. Tras el análisis respectivo, se concluyó que la dosificación de los aditivos provocó un aumento en las proporciones de agregado usadas, efecto que generó el incremento de la resistencia a la compresión, pero que no favoreció el desarrollo de trabajabilidad por un periodo considerable en el material.

- La granulometría y el tamaño máximo de las partículas afectan las proporciones relativas de los agregados, así como los requisitos de agua y cemento, la trabajabilidad, capacidad de bombeo, economía, porosidad, contracción y durabilidad del concreto. Las variaciones en la granulometría pueden afectar seriamente a la uniformidad del concreto de una revoltura a otra. Las arenas muy finas a menudo resultan antieconómicas; las arenas muy gruesas y el agregado grueso pueden producir mezclas rígidas, no trabajables. Conocida la composición granulométrica del material, se representa gráficamente para formar la llamada curva granulométrica del mismo. El agregado grueso debe estar bien graduado entre los límites fino y grueso, y debe llegar a la planta de concreto separado en tamaños normales, y que cumplan con los requisitos establecidos en la norma, dichos, permiten un rango relativamente amplio en la granulometría del agregado fino.

- La granulometría más conveniente para el agregado fino, depende del tipo de trabajo, de la riqueza de la mezcla, y del tamaño máximo del agregado grueso. En mezclas más pobres, o cuando se emplean agregados gruesos de tamaño pequeño, la granulometría

que más se aproxime al porcentaje máximo que pasa por cada malla resulta la más conveniente para lograr una buena trabajabilidad. En general, si la relación agua/cemento se mantiene constante y la relación de agregado fino a grueso se elige correctamente, se puede hacer uso de un amplio rango en la granulometría sin tener un efecto apreciable en la resistencia. En ocasiones se obtendrá una economía máxima, ajustando la mezcla del concreto para que encaje con la granulometría de los agregados locales. Entre más uniforme sea la granulometría, mayor será la economía.

6.2. Marco conceptual

6.2.1. Concreto

Según Kumar y Monteiro (1997) El concreto es un material compuesto que consiste en un medio de enlace dentro del cual se embeben partículas o fragmentos de agregado. Para ello se utiliza un cemento hidráulico, agua, triturado y Arena y en ocasiones aditivos que le confieren propiedades especiales a la mezcla[1]

6.2.2. Diseño de Mezcla

Es importante saber que se han realizado una gran cantidad de trabajos relacionados con los aspectos teóricos del diseño de mezclas de concreto, en buena parte se entiende que el diseño de mezcla es un procedimiento empírico, y aunque hay muchas propiedades importantes del concreto, la mayor parte de procedimientos de diseño están basados principalmente en lograr una resistencia a compresión para una edad determinada, así como la manejabilidad apropiada para un tiempo determinado. Además, se debe diseñar para unas propiedades que el concreto debe cumplir cuando una estructura se coloca en servicio. Como lo investigo Laura (2016) Una mezcla se debe diseñar tanto para estado fresco como para estado endurecido. Las principales exigencias que se deben cumplir para lograr una dosificación apropiada en estado fresco son las de manejabilidad, resistencia, durabilidad y economía[2]

6.2.3. Cemento portland

El cemento Portland es la mezcla de materiales calcáreos y arcillosos u otros materiales que contienen sílice, alúmina u óxidos de hierro, procesados a altas temperaturas y mezclados con yeso. Llamado así por la similitud con una piedra que abunda en Portland, Inglaterra. Según Goma (1979) Este material tiene la propiedad de fraguar y endurecer en presencia del agua, presentándose un proceso de reacción química que se conoce como hidratación. Hoy en día se fabrican diversos tipos de cemento para satisfacer diferentes necesidades y para cumplir con propósitos específicos sin embargo para los fines específicos de esta investigación se utilizará el Pórtland tipo 1 (Normal).

6.2.3.1. Cemento portland tipo 1.

Este cemento es utilizado para obras de concreto que no estén sujetas al contacto de factores agresivos, como el ataque de sulfatos existentes en el suelo o el agua, o a concretos que tengan

[1] Kumar Metha y Paulo Monteiro. Concreto. Estructura, propiedades y materiales. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. (1997). Pág. 2.

[2] Laura Huanca, Samuel. Diseño de Mezclas de Concreto [en línea]. Madrid: Universidad Nacional del Altiplano [citado 10 noviembre, (2016)].

un aumento cuestionable de la temperatura debido al calor generado durante la hidratación[3]; entre sus usos se incluyen: pavimentos, pisos, edificios de concreto reforzado, puentes, estructuras para vías férreas, tanques y depósitos, tubería, mampostería y otros productos de concreto reforzado.

6.2.4. Agregado

Siendo este uno de los materiales conformantes de la mezcla asfáltica, se hace necesario conocer su definición y tipos; ahora bien, se considera que la definición más acertada y clara:
"Son materiales granulares sólidos inertes que se emplean en los firmes de las carreteras con o sin adición de elementos activos y con granulometrías adecuadas; se utilizan para la fabricación de productos artificiales resistentes, mediante su mezcla con materiales aglomerantes de activación hidráulica (cementos, cales, etc.) o con ligantes asfálticos" [4].
Con respecto a los tipos de agregado pétreo, éstos pueden determinarse, de acuerdo a la procedencia y a la técnica empleada para su aprovechamiento; por lo que es posible clasificarlos en los siguientes tipos:

a) Agregados Naturales. Son aquellos que se utilizan solamente después de una modificación de su distribución de tamaño para adaptarse a las exigencias según su disposición final.

b) Agregados de Trituración. Son aquellos que se obtienen de la trituración de diferentes rocas de cantera o de las granulometrías de rechazo de los agregados naturales.

c) Agregados Artificiales. Son los subproductos de procesos industriales, como ciertas escorias o materiales procedentes de demoliciones, utilizables y reciclables. En esta clasificación se encuentran los agregados tipo RC&D´s.
d) Agregados Marginales. Los agregados marginales engloban a todos los materiales que no cumplen alguna de las especificaciones vigentes.[5]

6.2.5. Agregado grueso – fracción gruesa

El agregado grueso y/o fracción gruesa se describe como la porción del agregado retenida en el tamiz de 4.75 mm (No. 4)[6]
Grava: Partículas de roca que pasan el tamiz de 75 mm (3") de abertura y quedan retenidas en el tamiz de 4.75 mm (No.4). Presenta las siguientes subdivisiones.
Gruesa: pasa el tamiz de 75 mm (3") y queda retenida sobre el tamiz de 19 mm (3/4").
Fina: pasa el tamiz de 19 mm (3/4") y queda retenida sobre el tamiz de 4.75 mm (No.4).

6.2.6. Agua Para El Concreto

Es un ingrediente fundamental en la elaboración de concreto debido a que desempeña una función importante en estado fresco y endurecido. Generalmente se hace referencia a su papel en cuanto a la cantidad para proveer una relación agua/cemento acorde con las necesidades

[3]Trujillo, D., Valero, C. C., & Lozano, H. J. (2015). Comparación del comportamiento de una mezcla asfáltica adicionada con fibras de terlenka y una convencional. Trabajo de grado para optar al título de especialista en diseño y construcción de vías y aeropistas.

[4] Smith M. R. and L. Collins. Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas. Barcelona, 1994.

[5] Padilla Rodríguez, Alejandro. Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas…, Tesina, Universitat Politècnica de Catalunya, 2004, pág. 5, Disponible en internet: https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3334

[6] Artículo 400-13 de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del Instituto Nacional de Vías – INVIAS, en el numeral 400.2 Materiales.

de trabajabilidad y resistencia. Conforme al ASTM D1129 En cuanto a la adición durante el curado del concreto, no solamente su cantidad es importante, sino también su calidad química y física.[7]

6.2.7. Granulometría.

Es la distribución de los tamaños de las partículas que forman una masa de agregados y se determina mediante el análisis granulométrico. Según Niño (2010), para obtener un buen concreto, es necesario que la mezcla de arena y grava logre una granulometría que proporcione masa unitaria máxima, puesto que con esta condición el volumen de los espacios entre partículas es mínimo y por consiguiente la cantidad de pasta necesaria para pegarlas y para llenar los espacios entre ellas será mínimo, lo cual dará lugar a una mezcla de mejores condiciones técnicas y, además, económicas. Como aparece en la Revista de ingeniería de construcción de Chile: El análisis granulométrico consiste en hacer pasar los agregados través de una serie de tamices, que tienen aberturas cuadradas y cuyas características se ajustan a unos parámetros establecidos normativamente.[8]

6.2.8. Granulometría Combinada

Este tipo de Granulometría consiste en analizar en conjunto los porcentajes retenido de los agregados fino y grueso tal y como se presentarán en la mezcla, proporcionando un análisis más minucioso de cómo los agregados actuarán en el concreto, ya que algunas veces, hay una carencia en el abastecimiento de agregados de tamaños medianos, dando como resultado concretos de alta contracción, alta demanda de agua, baja trabajabilidad, baja bombeabilidad y dificultad de colocación, baja resistencia y poca durabilidad.

Partiendo de que la granulometría ideal no existe en el campo, si podemos acercarnos a ella considerando la combinación adecuada de agregados o tamizados, es por ello que la granulometría combinada se puede usar para mejorar el control de la trabajabilidad, la bombeabilidad y la retracción bajo dos premisas: La primera que para un contenido constante de cemento y una consistencia constante, existe una combinación óptima de agregados que producirá la relación agua-cemento más eficiente y la mayor resistencia. y la segunda que una gradación óptima tiene menor interferencia de las partículas y responde mejor a las vibraciones.

6.2.9. Propiedades Del Concreto

Las cuatro propiedades principales del concreto son: Trabajabilidad, Resistencia y Durabilidad.[9] Las características del concreto pueden variar en un grado considerable, mediante el control de sus ingredientes. Por tanto, para una estructura específica, resulta económico utilizar un concreto que tenga las características exactas necesarias, aunque esté débil en otras.

---

[7] ASTM D1129-13(2020), Standard Terminology Relating to Water, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, disponible en internet: www.astm.org

[8] Revista Ingeniería de Construcción Vol. 25 N°2, agosto de 2010, Pág. 215 disponible en internet: www.ing.puc.cl/ric PAG. 215-240

[9] Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C, 2004, disponible en internet: http://imcyc.com/boletin/revista.html

6.2.9.1. Trabajabilidad

Trabajabilidad. Es una propiedad importante para muchas aplicaciones del concreto. En esencia, es la facilidad con la cual pueden mezclarse los ingredientes y la mezcla resultante puede manejarse, transportarse y colocarse con poca pérdida de la homogeneidad.

6.2.9.2. Durabilidad

Es la capacidad que tienen las estructuras de concreto reforzado de conservar inalteradas sus condiciones físicas y químicas durante su vida útil cuando se ven sometidas a la degradación de su material por diferentes efectos de cargas y solicitaciones, las cuales están previstas en su diseño estructural.

6.2.9.3. Resistencia

Es una propiedad del concreto que, casi siempre, es motivo de preocupación. Por lo general se determina por la resistencia final de una probeta en compresión. Como el concreto suele aumentar su resistencia en un periodo largo, la resistencia a la compresión a los 28 días es la medida más común de esta propiedad.[10]

6.2.10. DISEÑO DE MEZCLA PARA UN CONCRETO DE 21 MPA CON AGREGADOS DE PESO NORMAL

El diseño de mezclas de hormigón; se basa en medir la cantidad de los materiales (cemento, agua, grava y arena) en peso y volumen, y se diseña tanto para una mezcla en estado fresco como endurecido. Antes de diseñar la mezcla, se deben tener datos previos del tipo de obra que se va a construir y los tipos de materiales que se van a usar para construir la obra.

6.2.10.1. Método A.C.I. 211 - Para Concreto Simple

El método se basa en trabajos experimentales de Abrams, Richard y Talbot, Goldbeck y Gray basado en la técnica de ensayo y error se puede programar con facilidad para tener un manejo fácil y práctico, se limita a concretos con dos agregados y un peso unitario entre 2000 kg/m3 y 2500 kg/m3, con resistencias menores a 42 MPa, tiene en cuenta la trabajabilidad, la resistencia y la durabilidad exigidas. Con base en proporciones iniciales se van realizando correcciones gradualmente hasta obtener la mezcla deseada.
Este método determina el contenido en volumen del agregado grueso por medio de la tabla 1, se debe tener en cuenta que se usa para unos agregados dados y un asentamiento especificado dentro de los límites prácticos, es necesario dejar constantes el contenido de agua y volumen absoluto de agregado grueso para mantener la misma trabajabilidad con cualquier relación A/C. De acuerdo con Bolívar (1987). Se recomiendan unos volúmenes de agregado grueso secos y compactados por volumen unitario de concreto en función del tamaño máximo del agregado grueso y del módulo de finura del agregado fino.[11]

[10] Merrit, Frederick S.; Manual del ingeniero civil, tomo II, 3ª Ed, J. W.; Composition and Properties of Concrete, McGraw-Hill Book Company, New York, 1968. 7.
[11] Giraldo Bolívar, Orlando; Guía práctica para el diseño de mezclas de hormigón; Bogotá, 1987.

Ilustración 1 Volumen de agregado grueso por metro cúbico de concreto

Tamaño máximo del agregado grueso		Volumen de agregado grueso seco compactado con varilla, por volumen unitario de concreto para diferentes módulos de finura de la arena			
mm	pulgadas	Módulo de finura			
		2.40	2.60	2.80	3.00
10	3/8	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5	1/2	0.59	0.57	0.55	0.53
20	3/4	0.66	0.64	0.62	0.60
25	1	0.71	0.69	0.67	0.65
40	3/2	0.76	0.74	0.72	0.70
50	2	0.78	0.76	0.74	0.72
70	3	0.81	0.79	0.77	0.75
150	6	0.87	0.85	0.83	0.81

Tomado de: NIÑO HERNÁNDEZ, Jairo René. Tecnología del concreto – Materiales, Propiedades y Diseño de Mezclas. Tomo 1. Tercera edición. ASOCRETO. 2010.

6.2.10.2. Elección Del Asentamiento

Los valores del asentamiento recomendados son los mostrados en la tabla 2. y se usan cuando el método de compactación utilizado es la vibración (para otros métodos se deben sumar 2,5 cm a los valores de la tabla.

Ilustración 2 Valores de asentamiento recomendados para diversas clases de construcción

ASENTAMIENTO (CM)	CONSISTENCIA (TIPO DE CONCRETO)	GRADO DE TRABAJABILIDAD	TIPO DE ESTRUCTURA Y CONDICIONES DE COLOCACIÓN
0-2,0	MUY SECA	MUY PEQUEÑO	Vigas o pilotes de alta resistencia con vibraciones de formaletas
2,0-3,5	SECA	PEQUEÑO	Pavimentos vibrados con máquina mecánica
3,5-5,0	SEMI-SECA	PEQUEÑO	Construcciones en masas voluminosas. Losas medianamente reforzadas con vibración. Fundaciones en concreto simple. Pavimentos con vibradores normales
5,0-10,0	MEDIA	MEDIO	Losas medianamente reforzadas y pavimentos, compactados a mano. Columnas, vigas, fundaciones y muros, con vibración
10,0-15,0	HUMEDA	ALTO	Secciones con mucho refuerzo. Trabajos donde la colocación sea difícil. Revestimiento de túneles. No recomendable para compactarlo con demasiada vibración

Tomado de: NIÑO HERNÁNDEZ, Jairo René. Tecnología del concreto – Materiales,

Propiedades y Diseño de Mezclas. Tomo 1. Tercera edición. ASOCRETO. 2010.

6.2.10.3. Elección Del Tamaño Máximo Nominal (TMN)

Se trata de elegir una adecuada granulometría, tener una masa más compacta y con menos vacíos. La tabla anexa muestra los valores recomendados del TMN para los diferentes tipos de construcciones.

Ilustración 3 Valores recomendados de TMN según el tipo de construcción

DIMENSIÓN MÍNIMA DEL ELEMENTO (cm)	TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL EN MM (PULGADAS)			
	MUROS REFORZADOS, VIGAS Y COLUMNAS	MUROS SIN REFUERZO	LOSAS MUY REFORZADAS	LOSAS SIN REFUERZO O POCO REFORZADAS
6-15	12(1/2") - 19(3/4")	19(3/4")	19(3/4") - 25(1")	19(3/4") - 38(1 1/2")
19-29	19(3/4") - 38(1 1/2")	38(1 1/2")	38(1 1/2") - 76(3")	
30-74	38(1 1/2") - 76(3")	76(3")	38(1 1/2") - 76(3")	76(3")
75 O MAS	38(1 1/2") - 76(3")	152(6")	38(1 1/2") - 76(3")	76(3") - 152(6")

Tomado de: NIÑO HERNÁNDEZ, Jairo René. Tecnología del concreto – Materiales, Propiedades y Diseño de Mezclas. Tomo 1. Tercera edición. ASOCRETO. 2010.

6.2.10.4. Estimación Del Contenido De Aire

El contenido de aire beneficia la manejabilidad y la cohesión de la mezcla. En la tabla muestra los valores recomendados para estimar el contenido de aire de la mezcla, teniendo como base las referencias que se especifican en la norma ACI 318 S-08.

Ilustración 4 Valores recomendados para el contenido de aire en el concreto para varios grados de exposición

AGREGADO GRUESO		PROCENTAJE PROMEDIO APROXIMADO DE AIRE ATRAPADO	PORCENTAJE PROMEDIO TOTAL DE AIRE RECOMENDADO PARA LOS SIGUIENTES GRADOS DE EXPOCISIÓN		
PULGADAS	mm		SUAVE	MEDIANO	SEVERO
3/8	9,51	3,0	4,5	6,0	7,5
1/2	12,50	2,5	4,0	5,5	7,0
3/4	19,10	2,0	3,5	5,0	6,0
1	25,40	1,5	3,0	4,5	6,0
1 1/2	38,10	1,0	2,5	4,5	5,5
2	50,8	0,5	2,0	4,0	5,0
3	76,1	0,3	1,5	3,5	4,5
6	152,4	0,2	1,0	3,0	4,0

Tomado de: NIÑO HERNÁNDEZ, Jairo René. Tecnología del concreto – Materiales, Propiedades y Diseño de Mezclas. Tomo 1. Tercera edición. ASOCRETO. 2010.

6.2.10.5. Estimación De La Cantidad De Agua

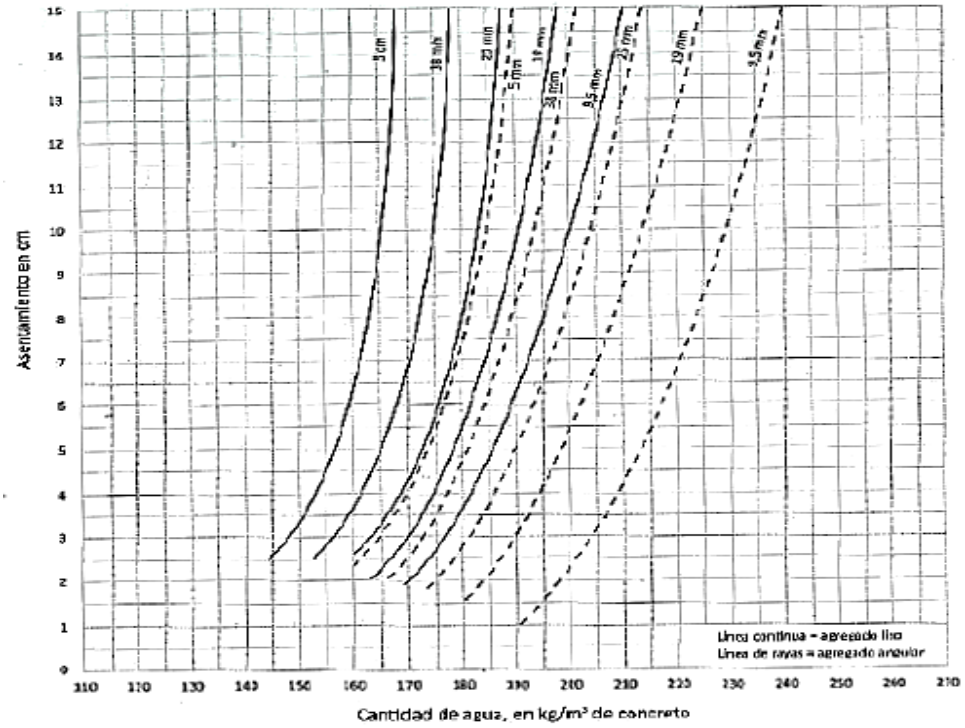
La demanda de agua en las mezclas se debe a aspectos de manejabilidad, adherencia e hidratación. La figura y tabla muestran el requerimiento de agua en la mezcla, que está en función del asentamiento y el TMN.

Ilustración 5 *Requerimientos aproximados de agua de mezclado*

Condición del contenido de aire	Asentamiento cm	Agua en kg/m³ de concreto para los TMN del agregado indicados							
		10	12,5	20	25	40	50	70	150
		—	—	—	—	—	—**	—**	—**
Concreto sin aire incluido	3 a 5	205	200	185	180	160	155	145	125
	8 a 10	225	215	200	195	175	170	160	140
	15 a 18	240	230	210	205	185	180	170	---
	Cantidad aproximada de aire atrapado en concreto sin aire incluido, por ciento	3	2,5	2	1,5	1	0,5	0,3	0,2
Concreto con aire incluido	3 a 5	180	175	165	160	145	140	135	120
	8 a 10	200	190	180	175	160	155	150	135
	15 a 18	215	205	190	185	170	165	160	---
	Promedio recomendable de contenido total de aire por ciento	8	7	6	5	4,5	4	3,5	3

Tomado de: NIÑO HERNÁNDEZ, Jairo René. Tecnología del concreto – Materiales, Propiedades y Diseño de Mezclas. Tomo 1. Tercera edición. ASOCRETO. 2010

Ilustración 6 *Curvas de requerimientos de agua de mezclado*



Tomado de: NIÑO HERNÁNDEZ, Jairo René. Tecnología del concreto – Materiales, Propiedades y Diseño de Mezclas. Tomo 1. Tercera edición. ASOCRETO. 2010

6.2.10.6. Estimación De La Relación Agua Cemento (A/C)

Este es el factor más importante en el diseño de mezclas de concreto, porque con él se pueden determinar los requisitos de resistencia, durabilidad, permeabilidad y acabado. Para determinar esta relación se utiliza la siguiente tabla.

Ilustración 7 Relación entre la resistencia a la compresión y algunos valores de la relación a/c

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN A LOS 28 DÍAS		CONCRETO SIN INCLUSOR DE AIRE (RELACIÓN ABSOLUTA POR PESO)	CONCRETO CON INCLUSOR DE AIRE (RELACIÓN ABSOLUTA POR PESO)
Kg/cm^2	PSI		
175	2500	0,65	0,56
210	3000	0,58	0,50
245	3500	0,52	0,46
280	4000	0,47	0,42
315	4500	0,43	0,38
350	5000	0,40	0,35

Tomado de: NIÑO HERNÁNDEZ, Jairo René. Tecnología del concreto – Materiales, Propiedades y Diseño de Mezclas. Tomo 1. Tercera edición. ASOCRETO. 2010

6.2.10.7. Cálculo Del Contenido De Cemento

Para el cálculo de cemento se utiliza la ecuación:

Ecuación 1

$$C = \frac{a}{a/c}$$

Los valores de agua y la relación agua/cemento (a/c) fueron calculados en los pasos 8.2.4 y 8.2.5

6.2.11. OPTIMIZACIÓN GRANULOMETRICA DE LA CANTIDAD DE AGREGADOS A UTILIZAR EN EL DISEÑO DE MEZCLA

Los agregados constituyen una gran porción del volumen total de la mezcla de concreto, el tipo de agregado tiene un impacto importante en las propiedades mecánicas ya que controlan en gran medida la rigidez y la fluencia de una mezcla de hormigón. Ya que la resistencia a la compresión es un parámetro controlado principalmente por la relación agua/cemento y el tipo y volumen del agregado entonces la gradación de los agregados juega un papel menor en la determinación de la resistencia del concreto pero es fundamental en la trabajabilidad puesto que al mejorar el acomodamiento y compactación de las partículas se logra una mayor densidad y con ello una menor capacidad de manejabilidad, hasta el momento se ha trabajado mucho para tomar la información de un análisis de tamices y desarrollar métodos y herramientas que ayuden a los usuarios a comprender mejor la gradación y proporcionar información sobre cómo la gradación afecta el rendimiento del concreto ya sea con una mezcla con un cierto porcentaje de vacíos el cuales tienen cantidades bajas y altas retenidas en un rango dado de tamaños de tamiz. Las recientes investigaciones han determinado que grandes cantidades (> 20% retenido) en una determinada muestra tiene un impacto significativo en la trabajabilidad, mientras Tener cantidades bajas no afectó drásticamente la trabajabilidad.

6.2.11.1. Método de Fuller – Thompson

Como lo menciona Giraldo O. en la guía práctica para el diseño de mezclas de hormigón, Después de realizar investigaciones, en el año 1907 Fuller y Thompson seleccionaron una curva granulométrica continua para hallar la mejor gradación de los agregados en las mezclas de concreto. Se recomienda usar este método cuando, la cantidad de cemento por metro cúbico de concreto supera 300 kg, la estructura a construir no está fuertemente armada los agregados no superan 2" ± 3/4", los agregados son de forma redondeada preferiblemente. (Bolivar, 1987). Por otra parte, Mosquera S. en su trabajo métodos de optimización de muestras granulométricas comenta que este método al igual que el método de Bolomey y Faury, son métodos analíticos diseñados para que no sean necesarios ensayos de campo o de laboratorio como los de asentamiento y resistencia, esto se realizó por medio de ensayos de trabajabilidad y masas unitarias máximas para ajustar las curvas y tablas. (Mosquera, 2019)

Ecuación 2

$$Y = 100\sqrt{\frac{d}{D}}$$

Donde:

- Y es el porcentaje en peso de los agregados que pasan a través del tamiz de abertura d.
- D es el tamaño máximo del agregado.
- d es el tamaño del tamiz.
- A es un coeficiente dependiente de la forma del agregado y consistencia del concreto.

Ilustración 8 Granulometría de Fuller y Thompson según el tamaño máximo nominal

d		D						
mm	pulg	mm	12.5	20	25	40	50	63.5
		pulg	1/2	3/4	1	3/2	2	2 1/2
63.5	2 1/2	⟶	--	--	--	--	--	100
50	2	⟶	--	--	--	--	100	89
40	3/2	⟶	--	--	--	100	86.6	77
25	1	⟶	--	--	100	81.6	70.7	63
19	3/4	⟶	--	100	87.2	71	61	55
12.5	1/2	⟶	100	81	70.7	57	50	44
9.5	3/8	⟶	87	71	61.6	50	43	39
4.75	N4	⟶	62	50	43.5	35	31	27
2.36	N8	⟶	44	35	30.7	25	22	19
1.18	N16	⟶	31	25	21.7	18	15	14
0.6	N30	⟶	22	18	15.5	12.5	11	9.7
0.3	N50	⟶	15	12.5	11	8.8	7.7	6.9
0.15	N100	⟶	11	8.8	7.7	6.2	5.4	4.8

Tomado de: MOSQUERA GÓMEZ, Sergio. Métodos de optimización de muestras granulométricas utilizadas en el diseño de mezcla de concreto simple hidráulico. 2019

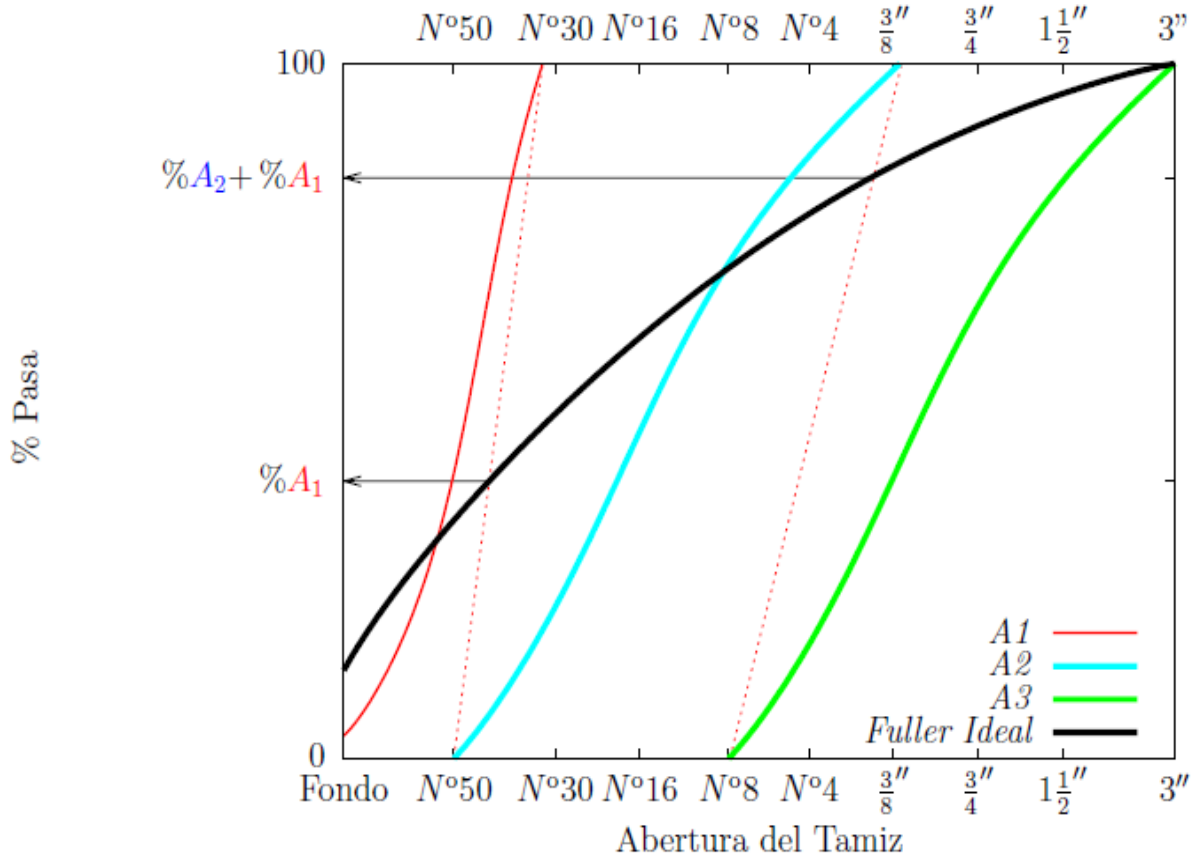
En la ilustración 8, se encuentran diferentes granulometrías utilizando el método de Fuller-Thompson.

El porcentaje en peso de agregado a mezclar se puede obtener por uno de los siguientes métodos:

6.2.11.1.1. Método por tanteos:

Como lo indica Giraldo O, se grafica la granulometría de los agregados a mezclar en una misma hoja, donde el eje de las abscisas estará dado por el tamaño del agregado (d) y en el eje de las ordenadas por los porcentajes acumulados luego deberán unirse con rectas los tamaños máximos y mínimos de agregados consecutivos. El punto donde estas rectas interceptan la curva de Fuller representa en las abscisas él % en volumen del agregado a combinar. (Bolivar, 1987)

Ilustración 9 Dosificación grafica de agregados mediante metodología Fuller



Tomado de: MOSQUERA GÓMEZ, Sergio. Métodos de optimización de muestras granulométricas utilizadas en el diseño de mezcla de concreto hidráulico simple. 2019

En la ilustración 9 se puede observar 3 tipos de agregado A1, A2 y A3, cada uno representado
por una curva de un color, los porcentajes de los agregados corresponden al valor en Y, asociados al cruce entre la curva de Fuller (línea negra) y las líneas que unen los valores máximos del agregado con el valor mínimo del siguiente agregado.

6.2.11.1.2. Método por los módulos de finura:

Determina la mejor combinación de materiales para el diseño de mezcla usando procedimientos matemáticos que se basan en el cálculo de los módulos de finura.

Si se consideran agregados (1, 2, 3… n) y sean los módulos de finura (M_{FI}, M_{F2}, M_{F3}…$M_{Fn)}$, y llamando, AIFFn, a los módulos de finura de Fuller cuyos tamaños máximos coinciden con los agregados 2, 3, 4, n. Ahora bien, deseamos determinar los porcentajes t_1,t_2, t_3… t_n, que debemos emplear de cada agregado, de tal modo que podemos plantear un sistema de ecuaciones con n incógnitas que serán los t_i

Ecuación 3

$$t_1 + t_2 + t_3 + \ldots + t_{n = 100}$$

Como la curva de composición debe tener un módulo de finura similar a MFF_i de la curva de Fuller podemos plantear la siguiente ecuación (Ec. 4)

Ecuación 4

$$MFFn = \frac{MF_1.t_1 + MF_2.t_2 + MF_3.t_3 + \cdots + MF_n.t_n}{t_1 + t_2 + t3 + \cdots + t}_{n}$$

Donde:
n es el número de agregados.
resolviendo el sistema de ecuaciones se obtienen los valores de t_i.

Por ejemplo, para dos agregados

Ecuación 5

$$t_1 + t_2 = 100$$

Es decir, la suma de los porcentajes es el 100 %.

Ecuación 6

$$MFF_2 = \frac{MF_1.t_1 + MF_2.t_2}{t_1 + t_2}$$

Por lo cual el módulo de finura mediante Fuller se toma usando el tamaño máximo del agregado

Ecuación 7

$$t_1 = 100\frac{MF_2. - MFF_2}{MF_2 + MF_2}$$

6.2.11.2. Método de Mínimos Cuadrados

Este método sirve para optimizar dosificaciones de árido que previamente se pretendan aproximar a leyes del tipo:

Ecuación 8

$$C_i = k\left(\frac{d_i}{D}\right)^n$$

donde:

- C_i es el (%) ideal de ´árido (en volumen) que pasa por el tamiz de luz di.
- d_i es la luz del tamiz en (mm)
- D es el tamaño máximo del árido.
- n es un exponente que en general es un número fraccionario. (Fuller y Bolomey n = ½)
- k es una constante.

Una vez obtenidos los puntos de una curva del tipo [1], se trata de aproximar a ellos lo más posible la curva de composición obtenida a partir del análisis granulométrico del árido disponible. A estos efectos se puede pensar en el conjunto de ecuaciones siguientes:

Ilustración 10 ecuaciones para planteamiento del problema

$$\begin{array}{cccccc}
a_{11}x_1 + a_{1_2}x_2 + \cdots + a_{1j}x_j + \cdots + a_{1n}x_n - c_1 = r_1 \\
a_{21}x_1 + a_{2_2}x_2 + \cdots + a_{2j}x_j + \cdots + a_{2n}x_n - c_2 = r_2 \\
\vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \\
\vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \\
a_{i1}x_1 + a_{i_2}x_2 + \cdots + a_{ij}x_j + \cdots + a_{in}x_n - c_i = r_i \\
\vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \\
\vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \\
a_{m1}x_1 + a_{m_2}x_2 + \cdots + a_{mj}x_j + \cdots + a_{mn}x_n - c_m = r_m
\end{array}$$

Tomado de: OLAYA, Manuel. Aplicación de métodos de mínimos cuadrados al ajuste de curvas granulométricas de áridos.

donde a^ = (%) del árido en volumen del grupo granulométrico* i, que pasa por un determinado tamiz j, en un análisis granulométrico realizado previamente.
Xi = tanto por 1, en volumen, del árido que entraría en la curva a obtener;
c. = corresponde al A-^ de la expresión [1], particularizado al tipo de curva que se emplee;

r. = residuo, tal que V r^ mín. ó / , n^ = Se cumple, por otra parte, que x^ = 1 — 2u ^' ^^^ i = l El sistema de ecuaciones [2] se puede expresar en forma matricial: A X — C = R

Donde:

Ilustración 11 ecuación matricial método de mínimos cuadrados

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1j} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{i1} & \cdots & a_{ij} & \cdots & a_{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mj} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix}; \quad X = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_j \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}; \quad C = \begin{pmatrix} c_1 \\ \vdots \\ c_i \\ \vdots \\ c_m \end{pmatrix}; \quad R = \begin{pmatrix} r_1 \\ \vdots \\ r_i \\ \vdots \\ r_m \end{pmatrix}$$

Tomado de: OLAYA, Manuel. Aplicación de métodos de mínimos cuadrados al ajuste de curvas granulométricas de áridos

Si en cada una de las m ecuaciones se resta cada uno de los coeficientes que afectan a las incógnitas x,^, según [3] se llegará a una ecuación matricial:

Ecuación 9

$$\bar{A}\bar{x} - \bar{c} = r$$

Donde:

Ilustración 12 Matrices ampliadas A

$$A = \begin{pmatrix} \overline{a_{11}} & \overline{a_{12}} & \cdots & \overline{a_{1j}} & \cdots & \overline{a_{1n-1}} \\ \overline{a_{21}} & \overline{a_{22}} & \cdots & \overline{a_{2j}} & \cdots & \overline{a_{2n-1}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \overline{a_{i1}} & \overline{a_{i2}} & \cdots & \overline{a_{ij}} & \cdots & \overline{a_{in-1}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \overline{a_{m1}} & \overline{a_{m2}} & \cdots & \overline{a_{mj}} & \cdots & \overline{a_{mn-1}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (a_{11} - a_{1n}) & (a_{12} - a_{1n}) & \cdots & (a_{1j} - a_{1n}) & \cdots & (a_{1n-1} - a_{1n}) \\ (a_{21} - a_{2n}) & (a_{22} - a_{2n}) & \cdots & (a_{2j} - a_{2n}) & \cdots & (a_{2n-1} - a_{2n}) \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ (a_{i1} - a_{in}) & (a_{i2} - a_{in}) & \cdots & (a_{ij} - a_{in}) & \cdots & (a_{in-1} - a_{in}) \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ (a_{m1} - a_{nm}) & (a_{m2} - a_{mn}) & \cdots & (a_{mj} - a_{mn}) & \cdots & (a_{mn-1} - a_{mn}) \end{pmatrix}$$

Tomado de: OLAYA, Manuel. Aplicación de métodos de mínimos cuadrados al ajuste de curvas granulométricas de áridos

Obteniendo:

Ilustración 13 Matrices ampliadas x, c y r

$$\overline{\mathbf{x}} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_j \\ \vdots \\ x_{n-1} \end{pmatrix} \qquad \overline{\mathbf{c}} = \begin{pmatrix} c_1 - a_{1n} \\ c_2 - a_{2n} \\ \vdots \\ c_i - a_{in} \\ \vdots \\ c_m - a_{mn} \end{pmatrix} \qquad \mathbf{r} = \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_i \\ \vdots \\ r_m \end{pmatrix}$$

Tomado de: OLAYA, Manuel. Aplicación de métodos de mínimos cuadrados al ajuste de curvas granulométricas de áridos

Después de aplicar el método de mínimos cuadrados, cuya demostración para cálculo matricial se puede encontrar en [2] y [3] (conservando las referencias del artículo original), se puede reducir el sistema de ecuaciones al siguiente:

Ilustración 14 sistema de ecuaciones lineales final

$$\begin{gathered}
\left[\overline{a_1}, \overline{a_1}\right] x_1 + \cdots + \left[\overline{a_j}, \overline{a_1}\right] x_j + \cdots + \left[\overline{a_{n-1}}, \overline{a_1}\right] x_{n-1} - \left[\overline{c_1}, \overline{a_1}\right] = 0 \\
\left[\overline{a_1}, \overline{a_2}\right] x_1 + \cdots + \left[\overline{a_j}, \overline{a_2}\right] x_j + \cdots + \left[\overline{a_{n-1}}, \overline{a_2}\right] x_{n-1} - \left[\overline{c_2}, \overline{a_2}\right] = 0 \\
\vdots \qquad\qquad \vdots \qquad\qquad \vdots \qquad\qquad \vdots \\
\left[\overline{a_1}, \overline{a_j}\right] x_1 + \cdots + \left[\overline{a_j}, \overline{a_j}\right] x_j + \cdots + \left[\overline{a_{n-1}}, \overline{a_j}\right] x_{n-1} - \left[\overline{c_j}, \overline{a_j}\right] = 0 \\
\vdots \qquad\qquad \vdots \qquad\qquad \vdots \qquad\qquad \vdots \\
\left[\overline{a_1}, \overline{a_{n-1}}\right] x_1 + \cdots + \left[\overline{a_j}, \overline{a_{n-1}}\right] x_j + \cdots + \left[\overline{a_{n-1}}, \overline{a_{n-1}}\right] x_{n-1} - \left[\overline{c_{n-1}}, \overline{a_{n-1}}\right] = 0
\end{gathered}$$

Tomado de: OLAYA, Manuel. Aplicación de métodos de mínimos cuadrados al ajuste de curvas granulométricas de áridos

Donde:

$$b_{11} = [\overline{a_1}, \overline{a_1}] \quad \textit{Ecuación 10}$$

$$b_{11} = [\overline{a_1}, \overline{a_2}] \quad \textit{Ecuación 11}$$

$$b_{22} = [\overline{a_2}, \overline{a_2}] \quad \textit{Ecuación 12}$$

$$d_1 = [\bar{c}, \overline{a_1}] \quad \textit{Ecuación 13}$$

$$d_2 = [\bar{c}, \overline{a_2}] \quad \textit{Ecuación 14}$$

6.2.11.3. Método De Shilstone

El Método de Shilstone fue publicado el año 2002 en la revista “Concrete International” por James Shilstone padre y James Shilstone hijo, su investigación se centró en la optimización de los agregados en el concreto, ya que, puede minimizar la necesidad de la pasta de cemento en la mezcla, puesto que al maximizar los agregados que son química y dimensionalmente más estables, disminuyen los costos. una granulometría continua evita la segregación, y mejora la trabajabilidad de la misma,
Algunos beneficios de optimizar la granulometría con áridos combinados, son los siguientes:

Para una dosis de cemento y consistencia fija, existe una configuración de áridos óptima, que dará una mayor resistencia a la mezcla (Taylor, 2014).

Una mezcla óptima tiene una menor interferencia de las partículas y responde mejor a vibraciones de alta frecuencia y amplitud, evitando segregación (Taylor, 2014). El contenido de pasta debe ser no mayor al necesario para proveer lubricación durante la colocación y el llenar los vacíos dejados por los agregados (Taylor, 2014), (Shilstone y Shilstone, 2002).

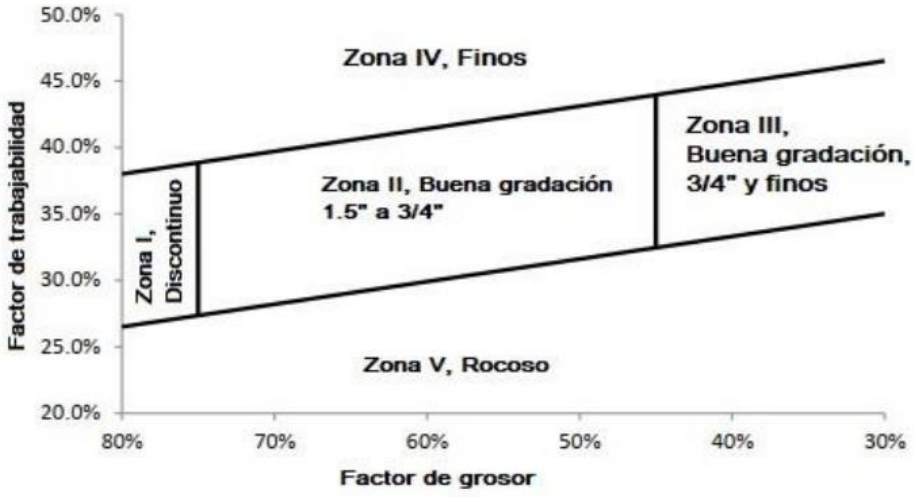
Shilstone recomienda que el contenido de pasta no sea mayor al requerido para lubricar durante la colocación y enlazar las partículas de áridos, para que así, resistan en conjunto las solicitaciones que tendrá la estructura durante su vida útil.

El Método de Shilstone grafica dos factores que se cree dan a la mezcla trabajabilidad y evita su segregación. Estos factores servirían para determinar el tamaño y uniformidad de la distribución de agregados combinados en la mezcla. Para determinar estos factores, y de acuerdo a la Figura 2.5, el Método de Shilstone divide el tamaño de los áridos en tres partes:

Árido Grueso (Q): Corresponde a aquellos tamaños que quedan retenidos en el tamiz 3/8”
Agregados Intermedios (I): Corresponde a aquellos áridos que pasan por el tamiz 3/8” pero son retenidos en el tamiz #8. Se consideran que son las partículas intermedias las que llenan los grandes huecos, ayudando a la movilidad de la mezcla. A su vez reduce la dosis de agua por lo que incrementa la resistencia reduciendo la cantidad de mortero en la mezcla.

Áridos Finos (W): Corresponden a los áridos que pasan por el tamiz #8, con ajuste debido al contenido de cemento.

Ilustración 15 carta Shilstone de factor grueso y trabajabilidad



Tomado de: Urquilla, R. Vásquez, A. Vivas. Evaluación de granulometría Shilstone y Curva de la Tarántula, mediante el ensayo De la caja, en mezclas de concreto Hidráulico para pavimento rígido en el Salvador 2021

Una vez que se tiene la granulometría de los áridos para las bandas combinadas, se calculan los dos factores, los cuales se definen a continuación:

Factor Grueso (FG): Consiste en la razón entre el porcentaje acumulado de árido que es retenido hasta el tamiz 3/8" y el porcentaje acumulado que es retenido hasta el tamiz #8.

$$CF = \frac{Q}{I} \times 100\% \qquad \textit{Ecuación 15}$$

Donde:
Q: porcentaje acumulado retenido sobre el tamiz de 3/8", (agregado de tamaño grueso).
I: porcentaje acumulado retenido en el tamiz # 8, (agregado de tamaño intermedio).

En la parte vertical de la carta, se grafica el factor de trabajabilidad. Que se determina de la siguiente manera:

$$WF = W + \left(\frac{2.5\times(C-325)}{56}\right) \qquad \textit{Ecuación 16}$$

Donde:
C: contenido de material cementante (Kg/m3).
W: porcentaje que pasa el tamiz #8.

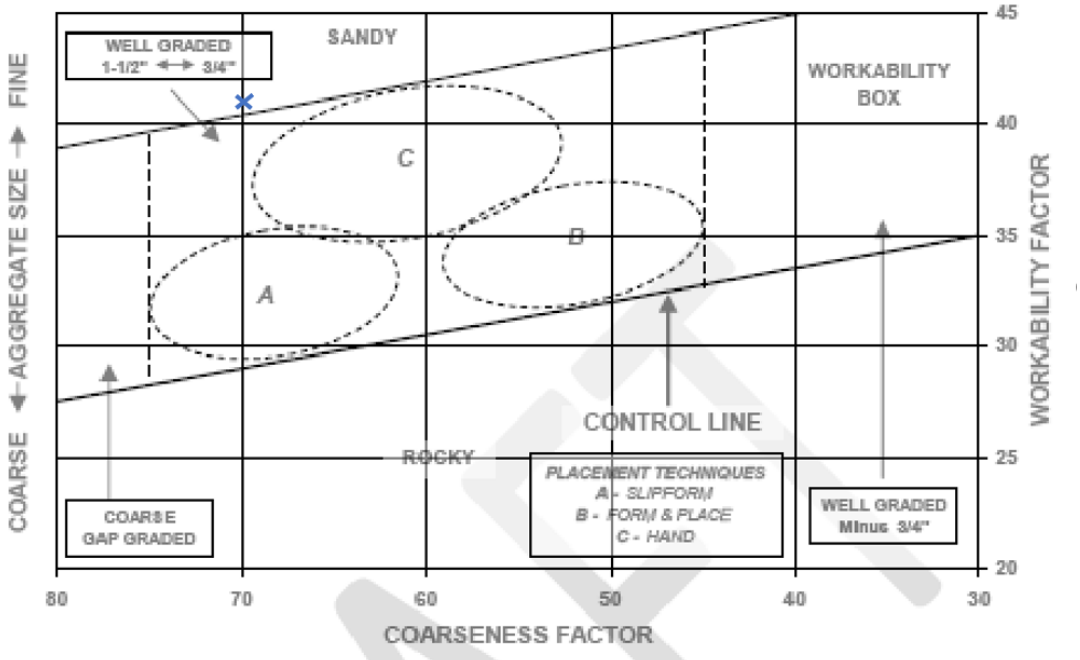
En la siguiente figura a continuación, se presenta el Gráfico de Shilstone, que está configurado por los dos factores presentados anteriormente, estos son: en el eje de las abscisas el Factor Grueso (FG) y en el eje de las ordenadas el Factor de Trabajabilidad (FT).

Zonificación del Gráfico. Como se aprecia en la ilustración 15 el Gráfico de Shilstone se divide en cinco zonas las cuales tienen las siguientes características:

- **Zona I**: Indica una mezcla que contiene vacíos, granulometría discontinua, y probabilidad alta de segregación durante su colocación y/o consolidación, mezclas no cohesivas propensas a la segregación, las mezclas de concreto de esta zona tienden a producir agrietamiento local, descamación y exfoliación.
- **Zona II:** Esta zona indica una mezcla óptima para hormigones que emplean agregados con tamaños máximos nominales entre 50 mm (2 pulg) y 19 mm (3/4 pulg), las mezclas ubicadas en estas zonas generalmente son consistentes de alta calidad, trabajables y de baja permeabilidad. Los agregados cercanos a la barra de tendencia o de los límites de la zona I y IV, requieren un control más detallado y ajuste de las proporciones para que las partículas no queden fuera de esta zona.
- **Zona III**: se presenta como una extensión de la zona II y es recomendada para agregados con tamaños máximos nominales de menos de 19 mm. (3/4 pulg)
- **Zona IV**: esta zona indica que hay un exceso de agregados finos, una granulometría discontinua, al usarlos en una mezcla de hormigón, estos presentaran segregación al momento de la consolidación y acabado. Las resistencias de las mezclas en esta zona podrán ser variables con una alta permeabilidad y probabilidad de agrietamiento. Además, al tener mayor contenido de finos requieren un mayor contenido de agua.
- **Zona V**: Es aquella mezcla que en general presenta una mayor proporción de agregados gruesos, generando mezclas poco plásticas de difícil trabajabilidad y presenta vacíos superficiales.
- Sectorización de la zona 2 del gráfico de Shilstone según método constructivo. Según el método de colocación existen tres zonas que son graficadas en la Figura 2.7. Éstas

son la A, B y C. Para mezclas ubicadas en zona A, los pavimentos exhiben un buen comportamiento al ser colocados por trenes pavimentadores, para los ubicados en zona B son mezclas más finas por lo que la pavimentación mecánica formada en terreno es más apropiada. Finalmente, la zona C es para concretos colocados y terminados con trabajo manual (ACI 325, 2014).

Ilustración 16 sectorización zonda 2 gráfico de Sinsonte



Tomado de: (ACI 325, 2014).

6.2.11.4. Método Curva De La Tarántula

De reciente desarrollo la metodología de "La Tarántula" consiste en una optimización granulométrica en diseños de mezcla de concreto representados mediante limites granulométricos predeterminados, y que pueden aplicarse en elementos de hormigón cuya aplicación se realice de forma manual.

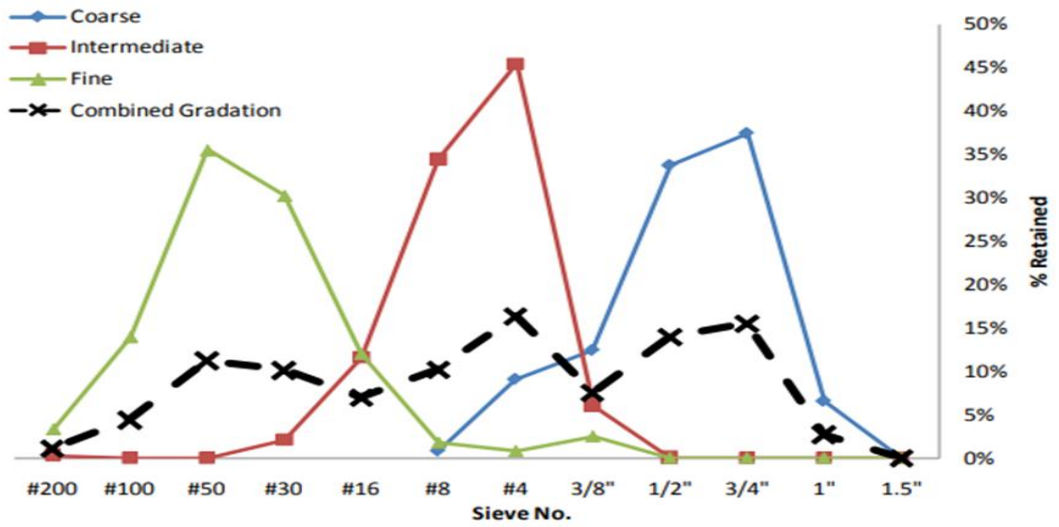
Su desarrolló se manifestó durante una investigación de la Universidad de Oklahoma en Estados Unidos que consistió en la búsqueda de desarrollar un nuevo método que proporcione información sobre cómo mejorar la trabajabilidad del concreto.

Esta metodología de ensayo fue implementada con el fin de evaluar de mejor manera el comportamiento de la gradación combinadas para los agregados de la mezcla, después de encontrar algunas deficiencias en los procedimientos de diseño convencionales, desarrollando un nuevo conjunto de recomendaciones y especificaciones de diseño después de 4 años intensos y tras ensayar alrededor de cuatro mil muestras de concreto y probar más de 80 combinaciones diferentes.

La “Curva de la Tarántula” fue desarrollada como una herramienta grafica para el proporcionamiento de la gradación adecuada de agregados pétreos existentes en el diseño de mezcla, teniendo en cuenta el porcentaje acumulado que pasa el porcentaje acumulado retenido, y el porcentaje individual retenido en cada tamaño de tamiz.
Lo anterior debido a que el acumulativo del porcentaje de aprobación ha sido la representación gráfica más típicamente utilizada de una gradación donde esta tiende a ocultar en gran manera la cantidad existente en un tamaño de tamiz y solo muestra tendencias generales de múltiples tamaños de tamices adyacentes.

Por ejemplo, Como se muestra en la ilustración 17 una gradación intermedia, una gradación gruesa y una gradación fina se grafican en porcentaje retenido individualmente en cada tamaño del tamiz. Sin embargo, cuando se grafica la gradación agregada combinada de una mezcla sobre el porcentaje individual retenido, hace que la distribución del tamaño del agregado individual sea más clara.

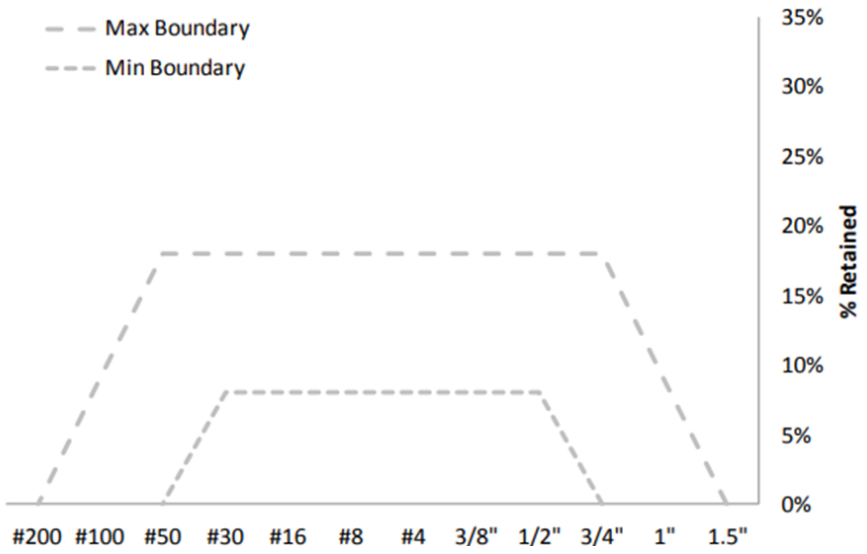
Ilustración 17 gradación individual que se integra como una sola combinación gradación



Tomado de: COOK, M. SEADER, N. TYLER, M. Investigation of optimized graded concrete for Oklahoma-phase 1

El porcentaje individual retenido se ha identificado como valioso para muchos autores como Shilstone 1990, y Taylor et al. 2007. Quienes A partir de la experiencia han especificado un límite máximo del 18% retenido y un mínimo retenido del 8% como se muestra en Figura 18, donde es evidente ha realizado una cantidad muy limitada de investigación para justificar estos límites.

Ilustración 18 es el porcentaje individual retenido en cada número de tamiz

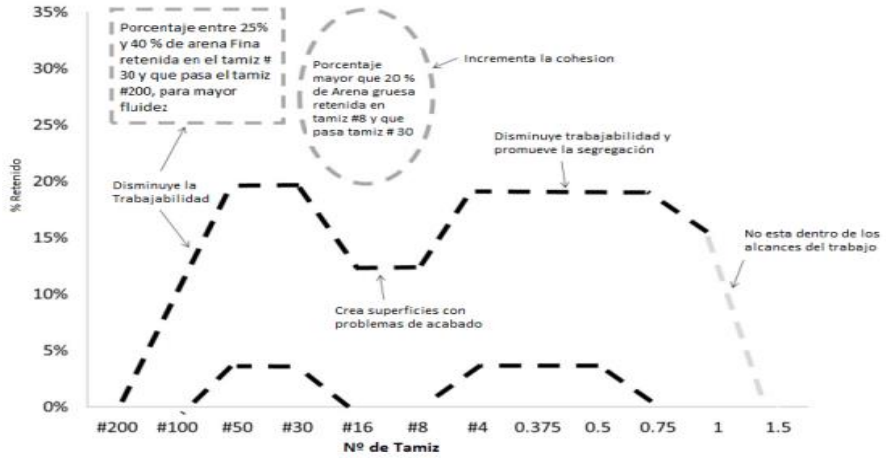


Tomado de: COOK, M. SEADER, N. TYLER, M. Investigation of optimized graded concrete for Oklahoma-phase 1

La curva de la tarántula provee para cada tamiz un límite máximo recomendado y un límite mínimo sugerido producto de la prueba y error realizada sobre más de 800 muestras. La gradación combinada debe estar dentro de los límites de cada tamaño de tamiz.

La Figura 19 muestra el tamaño de tamiz individual recomendado y los límites de proporción de una gradación combinada.

Ilustración 19 Descripción límites de la "curva de la tarántula



Tomado de: COOK, M. SEADER, N. TYLER, M. Investigation of optimized graded concrete for Oklahoma-phase 2

Límites de graduación combinados recomendados

Durante esta investigación, se observó que cuando los tamaños de tamices de agregado grueso retienen más del 20%, es probable que la trabajabilidad disminuya. Sin embargo, si una gradación tiene bajas cantidades en uno o dos tamaños de tamiz, esto no necesariamente

afectará el rendimiento del concreto. Aun así, puede ser difícil mantenerse dentro de los límites máximos si falta una gradación o si hay una pequeña cantidad en tamaños de tamiz adyacentes. La ilustración 19 muestra los tamaños de tamiz individual recomendados y los límites de dosificación para una combinación de gradación recomendada (Marllon D. Cook, 2013)

La cantidad de arena fina utilizada en la mezcla de concreto afecta su acabado y consolidación. Por lo tanto, se recomiendan los rangos prácticos de volumen de arena fina (#30 a #200) para concreto fluido del 25% al 40%.

Si la mezcla de concreto contiene una cantidad significativa de arena gruesa, es probable que se presenten problemas de acabado superficial. Estos problemas de acabado suelen ocurrir si la mezcla contiene más del 20% del tamaño de tamiz N.º 8, más del 16% del tamaño de tamiz N.º 16 y más del 12% entre los tamaños de tamiz N.º 8 y N.º 16.

Cohesión: Si existen bajas cantidades de arena gruesa (Nº8 a Nº30), la mezcla tenderá a segregar. Se recomiendan las siguientes cantidades mínimas de arena gruesa las cuales podrían crear una cohesión adecuada:

- 4% en el tamiz # 16 con 15% del tamiz # 30
- 12% en el tamiz # 8 con 15% del tamiz # 30
- 2% en los tamices # 8 y # 16 con 15% de # 30.

3.6.3.3. Aplicaciones prácticas

Es importante tener en cuenta que, si se exceden o no se cumplen los límites recomendados, aumenta significativamente el potencial de obtener una mezcla de concreto no deseada o defectuosa. La curva de tarántula y los límites de arena fina y arena gruesa proporcionan un rango conservador para seleccionar el agregado para concreto fluido. Al seguir estos criterios, es posible reducir la cantidad de cemento, agua, aditivos o los tres en una mezcla, lo que contribuirá a mejorar la sostenibilidad, economía y durabilidad a largo plazo del concreto.

Es importante mencionar que los límites sugeridos se eligieron para brindar una recomendación segura, independientemente de las fuentes de agregados investigadas, y se permite que uno o hasta tres puntos se encuentren fuera o cerca de sus límites. Al analizar los tamaños de tamices retenidos en las tres mallas consecutivas (Malla 3/4", Malla 1/2" y Malla 3/8"), se identifica que el exceso de material retenido en la Malla 1/2" se compensa con los otros dos tamaños de tamiz, principalmente con el de la Malla 3/8", cumpliendo así con los criterios de continuidad de esta metodología propuesta.

Diseño de la mezcla de la curva de la tarántula.

El procedimiento de diseño de mezcla de la curva de la tarántula es basado principalmente en la cantidad de agregados, dado que estos constituyen del 70 % al 80 % de una mezcla de concreto, tiene sentido que guíen su diseño en los siguientes pasos:

1. Encontrar el tipo de aplicación a utilizar:

Tabla 1
Contenido de cemento según el tipo de aplicación

aplicación	Depresión	contenido de ligante (lb)	% de pasta suponiendo 0,45 p/c
Losas y viguetas	<= 2"	470	21
pavimento o muro formado por deslizamiento	4"	517	24
trabajo colocado a mano o mediante golpeo manual	6"	564	27
bombeo de losas de losas de los puentes o de hormigón estructural	8"	611	30

Tomado de: Elaboración propia

Para hacer esto, generalmente se comienza con una hoja de cálculo y revisando las gradaciones agregadas en un gráfico retenido por porcentaje se trata de elegir fuentes de agregados que no tengan mucha superposición entre sus tamaños.

A continuación, se elige una cantidad inicial de cada tipo de agregado, iterando hasta obtener el volumen correcto, una gradación W en la tarántula.

La primera identificación o conjetura típicamente se ha visto representada

40% en volumen de grandes áridos gruesos
20% en volumen agregado intermedio
40% agregado fino

estas son solo una primera suposición, se debe repetir en función de la gradación agregada, el costo.

Durante la dosificación de prueba, se debe encontrar la dosificación de la mezcla para obtener la trabajabilidad deseada. si su mezcla requiere una dosis muy grande de aditivos.
entonces probablemente debería repetir el proceso con más aglutinante en la mezcla.
debe verificar su trabajabilidad, resistencia y durabilidad.

Limitaciones

este método de diseño es muy joven y está evolucionando rápidamente. también tienes que vigilar tus gradaciones, características agregadas muy de cerca. necesitas una hoja de cálculo, por ahora.

6.2.11.5. Resumen de las metodologías

Una vez estudiados todos los fundamentos teóricos para cada una de las metodologías se procede a presentar un resumen con las características de cada una para abarcar una idea global en cuanto a sus usos, ventajas y desventajas

Tabla 2
Análisis teórico de las metodologías

Análisis teórico de las metodologías.				
METODOLOGIA	**BASE DEL METODO**	**RECOMENDADO PARA**	**VENTAJAS**	**DESVENTAJAS**
FULLER	Cómo varios de los métodos analíticos buscan llegar a una curva típica, mediante módulos de finura, o intersección de curvas granulométricas, pueden hacerse uso de dos o más agregados este método puede usarse de manera gráfica o analítica.	Este método es adecuado para estructuras que tienen un alto nivel de refuerzo, una alta cantidad de cemento por metro cúbico de concreto (más de 300 kg), y requieren agregados con un tamaño máximo de 2 pulgadas y una forma redondeada preferiblemente.	El método grafico es sencillo y rápido, se grafican las curvas granulométricas existentes y la curva ideal, interceptadas por medio de líneas que se unen a los tamaños máximos y mínimos de agregados consecutivos, determinando así los porcentajes de volumen de agregado a combinar. El método analítico tiene una mayor precisión.	Se puede decir que el método gráfico es menos preciso en comparación con el método analítico. Por otro lado, el método analítico puede dificultarse cuando se emplean más de dos tipos de agregados.
MINIMOS CUADRADOS	Este método busca optimizar dosificaciones de granulometrías Mediante la aplicación de método de mínimos cuadrados.	El método debe usarse para optimizar granulometrías, de Fuller Bolomey, Rothfues o aquellas que se aproximen a leyes de tipo: $C_i = k\left(\frac{d_i}{D}\right)^n$	Es un método que aporta mayor precisión en la dosificación de agregados, puesto que optimiza métodos de diseño de mezcla analíticos, además puede usarse para optimizar diseños con dos o más tamaños de agregados.	Al ser un método matemático, podría dificultarse la obtención de % de volúmenes de agregados pues se requiere tener conocimientos en métodos analíticos para encontrar el % de volúmenes de agregados.
SHILSTONE	Consiste en la optimización de los agregados de un diseño de mezcla mediante el uso de la carta de factor grosor, donde se predice las características de la mezcla mediante la combinación del factor grueso y factor de trabajabilidad. y la carta de % retenido, que permite mantener la gradación dentro de los límites. (El % que retiene el tamiz n° 30 y que sea menor que el tamaño Max Nom en un rango 8-22 %).	La metodología de Shilstone es muy recomendable en Mezclas De Concreto Hidráulico Para Pavimento Rígido, concretos de alta calidad y/o alto rendimiento	Una mayor trabajabilidad de las mezclas de concreto sin perder propiedades de resistencia y durabilidad. Es un método seguro y preciso que usa dos elementos de control, como la carta de factor grosor y la carta de porcentaje retenido, además de la gráfica de la carta de power 45. La ubicación de las mezclas en zonas permite predecir el comportamiento de la misma, generando correcciones y ajustes de ser necesarias.	Al ser un método que usa dos elementos de control, cada uno con especificaciones individuales que deben ser cumplidas, para que la mezcla de concreto sea optima. requiere de una mayor comprensión de lo que sucede en las zonas de la carta de factor grosor y los límites de la carta de % retenido para que la optimización sea adecuada.
CURVA DE LA TARANTULA	Consiste en trazar una curva en un gráfico de porcentaje de retenido acumulado versus tamaño de partícula, para cada tipo de agregado utilizado en la mezcla. Luego se superponen estas curvas para crear la "curva de la tarántula", que representa la distribución ideal de los tamaños de partículas en la mezcla de agregados.	La metodología de curva de la tarántula es recomendable en Mezclas De Concreto Hidráulico Para Pavimento Rígido.	Al ser un método no analítico, solo debe ajustarse los pesos de los agregados a manera de tanteo, buscando que la granulometría del material se adapte a los límites de la gráfica de la curva de la tarántula.	La manera en que la curva granulométrica del material se adapta a la gráfica de la curva de la tarántula es subjetiva y propia del diseñador. Puesto que el método se realiza mediante tanteo.

Tomado de: Elaboración propia

6.3. Marco Histórico

Según Bastidas-Arteaga[12], los sistemas de infraestructura civil son bienes críticos para el desarrollo socioeconómico de un país. Es por eso que mundialmente se está continuando con un esfuerzo colectivo para que el concreto armado siga siendo el principal material de construcción y evolucione frente a los requerimientos modernos de resistencia, manejabilidad, durabilidad, funcionalidad y seguridad.

El uso del concreto data de hace más de 2.000 años, una muestra de ello es el Panteón Romano una estructura muy conservada de la antigüedad en la que se aprecia la capacidad

[12] BASTIDAS-ARTEAGA, Emilio. Probabilistic service life model of RC structures subjected to the combined effect of chloride-induced corrosion and cyclic loading. Tesis doctoral. Bogotá, Colombia: Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería, 2009. 173 p., p. 1

del concreto estructural siendo elaborado con pasta de caliza calcinada (cal viva) y adición de ceniza puzolánica[13] utilizada por mucho tiempo como único material aglutinante pero que debido a que la cal no resistía de manera adecuada la acción del agua comenzó a mezclarse con diferentes materiales en búsqueda de una mejor capacidad.

Pero fue hasta 1756 que se presentó al mundo el primer conglomerante hidráulico gracias investigaciones del ingeniero proveniente de Inglaterra John Smeaton, luego en 1818, el francés Louis Vicat desarrollo investigaciones sobre la hidratación del cemento. Aunque fue hasta 1824 cuando el Ingles Joseph Aspdin obtiene la patente del cemento Portland, llamado así por el parecido color oscuro resultante similar a la piedra de la isla de Portland.

Si bien la aparición del cemento portland fue un gran avance tecnológico su desarrollo no está completo si no se contemplan los demás materiales que componen la pasta de concreto por tal razón se comenzó a implementar lo que se conoce como el diseño de mezcla el cual a partir de la caracterización de los agregados y su dosificación permite
lograr una resistencia a compresión para una edad especificada, así como una trabajabilidad adecuada.
Antes del siglo XIX solo se utilizaban para la confección del concreto, proporciones preestablecidas empíricamente, por ejemplo, se especificaban mezclas 1:3 por volumen suelto para pavimentos, 1:5 para losas, 1:4 para vigas y columnas, etc.). Esto era permitido en la época puesto que la calidad del concreto era poco controlada, pero con el paso del tiempo para aplicaciones que se le han dado al concreto se hizo indispensable utilizar procesos para el diseño de mezclas que cumplan las rigurosas especificaciones que se les exigen a los materiales de construcción.

Durante los años 1900 Las metodologías para el diseño de mezclas de concreto se producen a partir de procedimientos experimentales gracias a los trabajos de Feret, Fuller y Thompson, Abrams, Bolomey, los cuales marcaron un hito en la investigación y desarrollo del concreto como material de construcción.
Actualmente La Comunidad academia y la industria de la construcción unen cada vez más sus esfuerzos para desarrollar concretos de mayor desempeño y mejor calidad.
Según diferentes proyecciones de la demanda global del concreto se aprecia que, en los próximos 40 años, la producción de este material seguirá aumentando[14]. En correspondencia nuevas mejoras, no solo garantizando que las estructuras mantengan apropiada resistencia y rigidez para soportar las cargas y limitar las deformaciones, sino también altos desempeños del material, como ultra alta resistencia, alta fluidez, manejabilidad constante, estabilidad volumétrica, baja contracción, mejor comportamiento térmico, baja permeabilidad, y altas resistencia a condiciones de exposición; cualidades que hoy en día ya se están manejando.

[13] WALKER, R. y PAVÍA, S. Physical properties and reactivity of pozzolans, and their influence on the properties of lime–pozzolan pastes. En: Materials and Structures. Julio 2011. vol. 44, no. 6, 1139-1150. http://dx.doi.org/10.1617/s11527-010-9689-2

[14] PACHECO, *et al*., An overview on concrete carbonation in the context of eco-efficient construction: Evaluation, use of SCMs and/or RAC, Op. cit., p. 141.

6.4. Marco Normativo.

Especificaciones técnicas de la sección 400 (concreto hidráulico), normas de ensayo de materiales para carreteras, NTC.

- NTC 121 CEMENTO PORTLAND ESPECIFICACIONES FÍSICAS Y MECÁNICAS
- NTC 174 ESPECIFICACIONES DE LOS AGREGADOS PARA CONCRETO
- NTC 176 MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD RELATIVA (GRAVEDAD ESPECÍFICA) Y LA ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO
- NTC 237 MÉTODO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD Y ABSORCION DEL AGREGADO FINO
- NTC 92 MÉTODO PARA DETERMINAR LA MASA UNITARIA COMPACTADA O SUELTA DE LOS AGREGADOS GRUESOS
- NTC 127 MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA IMPUREZAS EN EL AGREGADO FINO
- NTC 130 MÉTODO DE ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN DE PARTÍCULAS LIVIANAS EN LOS AGREGADOS
- NTC 589 MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL PORCENTAJE DE TERRONES DE ARCILLA Y PARTÍCULAS DELEZNABLES EN LOS AGREGADOS
- NTC 93 -98 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE DE LOS AGREGADOS GRUESOS
- NTC 77 MÉTODO DE ENSAYO PARA EL ANÁLISIS POR TAMIZADO DE LOS AGREGADOS FINOS Y GRUESOS.
- NTC 3459 AGUA PARA LA ELABORACIÓN DE CONCRETOS.
- NTC 454 TOMA DE MUESTRAS CONCRETO FRESCO.
- NTC 396 MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL ASENTAMIENTO DEL CONCRETO
- NTC 550 ELABORACIÓN Y CURADO DE ESPECÍMENES DE CONCRETO EN OBRA.
- NTC 673 ENSAYO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE ESPECÍMENES CILÍNDRICOS DE CONCRETO.

7. DISEÑO METODOLÓGICO

7.1. Tipo De Investigación

Es una investigación cuantitativa de carácter experimental debido a que se relaciona la causa-efecto entre las siguientes variables: La variación de la resistencia y trabajabilidad de las mezclas de concreto al emplear los métodos Fuller- Bolomey, Mínimos cuadrados y curva de la tarántula.

7.2. Población

La población corresponde a la mezcla de concreto normal de 21Mpa.

7.3. Muestra

La muestra corresponde a la fracción gruesa y fina del agregado de la mezcla de concreto normal de 21 MPa.

7.4. Variables

Las variables que se analizarán en el proyecto de investigación son de carácter cuantitativo: la dosificación, resistencia y trabajabilidad de las mezclas de concreto al emplear los métodos Fuller- Bolomey, Mínimos cuadrados comparándolo curva de la tarántula.

7.5. Alcance

El alcance de la presente investigación es de tipo cuantitativa, por medio de dos ensayos básicos ya mencionados y los métodos de dosificación, se comparará la dosificación, trabajabilidad, y resistencia de la mezcla de concreto de 21 optimizando la dosificación de los agregados mediante la metodología de la curva de la tarántula.

8. DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño experimental contiene los procedimientos utilizados para determinar el número de muestras a fallar, los factores influyentes en el diseño de mezcla, y las diferentes metodologías permitirá analizar que los resultados obtenidos:

8.1. Elección De Los Factores, Niveles Y Rangos Ideales.

Para la elaboración de los diferentes diseños de mezcla los materiales y elementos utilizados deben cumplir con los siguientes parámetros:

8.2. Factores de diseño

- Utilización de metodologías aplicadas a los diferentes diseños de mezcla de concreto.
- Cantidad de cemento requerido en el diseño de mezcla.
- Cantidad de agregado grueso requerido en el diseño de mezcla.
- Cantidad de agregado fino requerido en el diseño de mezcla.
- Cantidad de agua requerida en el diseño de mezcla
- Adición de Agregados de peso normal para el mejoramiento de trabajabilidad y resistencia del concreto.
- Contenido de humedad de los agregados gruesos y finos.
- Granulometría del agregado grueso y fino.
- Humedad presente en los agregados gruesos y finos.
- Características físicas, químicas, y mineralógicas de los agregados gruesos y finos.
- Densidad y absorción de los agregados gruesos y finos.
- Contenido de materia orgánica de los agregados gruesos y finos.
- Sustancias químicas presentes en los agregados.
- Masas unitarias de los agregados.
- Resistencia a la abrasión del agregado grueso.
- Humedad y temperatura presentes en el ambiente.
- Forma de las partículas de agregado

Cada uno de los factores que intervienen en el proceso de mezcla de concreto en estado fresco dependen del estado de sus componentes (agua, cemento, agregados), y deben ser controlados a través de la utilización de los ensayos de laboratorio descritos en el cronograma

del presente informe, logrando así contrarrestar favorablemente los errores generados por los componentes además de tener un control de los factores ambientales como la humedad natural y temperatura del entorno.

La siguiente tabla presenta en resumen las principales variables que modifican la resistencia y la trabajabilidad en los diseños de mezcla:

Ilustración 20 Causas de variación de resistencia

Variaciones de las propiedades del concreto	Discrepancias en los métodos de ensayo
Cambios en la relación a/c - Deficiente control de agua - Excesiva variación de humedad en el agregado - Refrescado	Procedimientos incorrectos en el muestreo
Variación en la cantidad de agua - Granulometría del agregado, absorción y forma de la partícula. - Propiedades de los cementantes y los aditivos. - Contenido de aire - Tiempo de entrega y temperatura.	- Variaciones debidas a las técnicas de elaboración de las muestras. - Manejo y curado de cilindros recién elaborados. - Moldes de calidad deficiente.
Variaciones en las características y proporciones de los componentes : - Agua - Agregado - Cemento - Adiciones - Aditivos	Cambios en el curado: - Variación en la temperatura - Humedad variable. - Retraso en el traslado de los cilindros al laboratorio.
Variación en el transporte, la colocación y la compactación.	Procedimientos de ensayo deficientes. Refrentado de los cilindros
Variación en la temperatura y en el curado.	Ensayos de compresión

Fuente. Tomado de NTC 2275. Procedimiento recomendado para la evaluación de los resultados de los ensayos de resistencia del concreto.

Tomado de: NTC 2275. Procedimiento recomendado para la evaluación de los resultados de los ensayos de resistencia del concreto

8.3. Factores que permanecen constantes

- Los factores que permanecerán constantes en la fase de experimentación para determinar si la metodología de la curva de la tarántula provoca mezclas más manejables con respecto a las elaboradas mediante las teorías convencionales están ligados a las características físicas y mecánicas de los agregados.
- Metodología utilizada para la realización del diseño de mezcla de concreto.
- Cantidad de cemento requerido en el diseño de mezcla.
- Cantidad de agua requerida en el diseño de mezcla.

Factores variables

Los factores que se permiten variar en el experimento son los siguientes:

- Contenido de humedad de los agregados gruesos y finos.
- Granulometría del agregado grueso y fino.
- Características físicas, químicas, y mineralógicas de los agregados gruesos y finos.
- Adición de Agregados de peso normal para el mejoramiento de trabajabilidad y resistencia del concreto.
- Densidad y absorción de los agregados gruesos y finos.
- Contenido de materia orgánica de los agregados gruesos y finos.

- Sustancias químicas presentes en los agregados.
- Masas unitarias de los agregados.
- Resistencia a la abrasión del agregado grueso.

Los factores anteriormente mencionados son los que presentan variación durante el experimento, ya que, a través de la consulta de la bibliografía, y trabajos de grado relacionados con la fabricación de concreto la distribución granulométrica varia las magnitudes de resistencia a la compresión y trabajabilidad del concreto.

8.4. Factores perturbadores

Los posibles factores que pueden tener efectos perturbadores en el experimento en consideración son:
Factores controlables
Los factores perturbadores controlables identificados en el diseño experimental se mencionan a continuación:

- No controlables o de ruido.
- Para el diseño experimental se identificaron los siguientes factores no controlables, que se pueden medir durante la realización de las actividades descritas en el presente informe.
- Humedad relativa.
- Temperatura.

8.5. SELECCIÓN DE LA VARIABLE DE RESPUESTA.

Resistencia a la compresión Esta variable de respuesta depende principalmente de los componentes de la mezcla de concreto en especial de la distribución granulométrica de las partículas. En este caso el experimento es de carácter comparativo simple correspondiente a la magnitud de la resistencia a la compresión de las muestras cilíndricas.

Cada uno de los cilindros de muestra se fabricará considerando los requisitos descritos en las normas técnicas NTC 504, 550 y 1377. Además, se recopilará información siguiendo las pautas de la NTC 673 (un ensayo para medir la resistencia a la compresión en muestras cilíndricas), incluyendo los tiempos de tolerancia, las unidades de medida significativas del equipo y cualquier posible sesgo causado por factores externos. Se utilizará un total de 15 muestras cilíndricas para cada uno de los cuatro diseños de mezcla, las cuales deberán ser evaluadas a los 7 y 28 días después de su fabricación. Cada muestra será numerada de manera aleatoria del 1 al 15 y debidamente identificada.

8.6. Elección De Los diseños Y Tamaño de la Muestra

Una vez obtenida la caracterización de los materiales, se realizará la estimación de la cantidad requerida de agregados fino y grueso a ser la utilizados en los 4, Métodos descritos anteriormente; luego se procederá a diseñar la mezcla, una vez encontradas las dosificaciones de los materiales se procede a fundir una serie de probetas cilíndricas, durante este proceso se evaluarán las características de la mezcla en estado fresco, en este caso su trabajabilidad, una vez fundidas las probeta deben mantenerse curadas bajo inmersión con el fin de identificar el resultado ultimo de desarrollo de la variable (resistencia a la compresión) a los 28 días mediante el sometimiento de ensayos según la norma NTC 673, a (Ensayo de resistencia a la compresión

de especímenes cilíndricos de concreto). A partir de allí se espera que el factor modificado en este diseño de mezcla (optimización de agregados por curva de la tarántula), iguale o mejore los resultados de las variables de respuesta (resistencia a la compresión del concreto y trabajabilidad) comparados con los métodos de optimización tradicionales; Luego de conocer los resultados de resistencia a la compresión de las probetas fundidas a partir de este diseño de mezcla se realizará un análisis estadístico el cual permita validar si los resultados son confiables, permitiendo realizar una comparativa entre las metodologías; este proceso se repetirá con cada uno de los métodos de optimización faltantes (Fuller, mínimos cuadrados, Shilstone).

Teniendo en cuenta lo anterior se describe a continuación el procedimiento utilizado para elegir el tamaño de la muestra (cantidad de probetas cilíndricas a fallar) en este experimento, estudiar a toda la población, que sería la manera más exacta de conocer lo que se pretende estudiar, es casi imposible, entre los motivos que lo impiden se encuentran la falta de tiempo, la escasez de recursos humanos y económicos, la dificultad para acceder a todos los sujetos, etc., por lo que se estudia sólo a una parte de ellos, para, posteriormente, generalizar o inferir los resultados obtenidos a toda la población.

Debido a que la comparación se realizará mediante el enfrentamiento directo entre los resultados de dos métodos de optimización de mezclas de concreto se procede a hallar, el intervalo de confianza para estimar una proporción el cual está determinado por la estimación puntual (por) y por la amplitud o anchura de dicho intervalo, denominada «precisión» (d):

Ecuación 17

$$d = Z_{\alpha}\sqrt{\frac{p_o \times q_0}{n}}$$

Despejando n, se obtiene la fórmula para calcular el número de observaciones o individuos necesarios para estimar una proporción:

Ecuación 18

$$n = \frac{z_{\alpha}^2 * p_0 * q_0}{d^2}$$

Donde:

n = tamaño de la muestra

Zα = Parámetro estadístico que depende del Nivel de confianza y esta parametrizado en la siguiente tabla:

Tabla 3
Nivel de confianza

Nivel de significación (A)	Intervalo de probabilidad (1-A)	2 colas
0.1	0.9	1.65
0.05	0.95	1.96
0.01	0.99	2.58

0.001	0.999	3.29

Tomado de: Elaboración propia

p_0 = Es la probabilidad de que el parámetro a estimar ocurra eventualmente con éxito y se encuentre en el intervalo de confianza.

q_0 = se designa mediante 1 − p, y se suele tomar en tanto por ciento.

e = error de estimación máximo aceptado

- Para efectos de nuestro ejercicio se tomarán lo siguientes valores:

Debido a que los niveles de confianza más usuales son: 90%; 95% y 99% se tomó el más bajo como:

Nivel de Confianza = 90%
Zα tomado de la tabla = 1,645
Ya que la probabilidad de que el evento ocurra o no es incierta en este caso se toma

p_0 = 50%
q_0 = 50%

debido a que los errores aceptables para este tipo de ensayos no son tan severamente estrictos se determinó por nuestra parte tomar un error admisible estimado de

e = 7,5%

Reemplazando en la ecuación 18 tenemos:

$$n = \frac{1{,}645^2 * 0{,}5 * 0{,}5}{0{,}075^2}$$

Despejando n resulta que el tamaño de la muestra es:

$$n = 120{,}27 \approx 120 \text{ probetas}$$

Ya que el nivel de significancia se designa mediante α, es evidente que las dos cosas más importantes que determinan el intervalo de confianza son las que se han de tener en cuenta para calcular el tamaño de la muestra: la anchura del intervalo o precisión (d= 1/2 de la amplitud del IC) y la confianza o seguridad establecida (1 - p). Ambas han de ser determinadas a priori por el investigador, al igual que el valor de p que se pretende estimar.

En la siguiente tabla se encuentra el resumen del número de probetas a ensayar por método de optimización, los días a los que se fallaran y el total de las mismas.

Tabla 4
Cantidad de probetas a ensayar

Cantidad de probetas a ensayar			
Tiempo en días para desarrollo de la resistencia a la compresión	**7 días**	**28 días**	**Total**
Ensayo (optimización método de Fuller)	15	15	30
Ensayo (optimización método de Mínimos cuadrados)	15	15	30
Ensayo (optimización método de Shilstone)	15	15	30
Ensayo (optimización método Curva de la Tarántula)	15	15	30
TOTAL, DE PROBETAS PARA ENSAYOS		120	

Tomado de: Elaboración propia

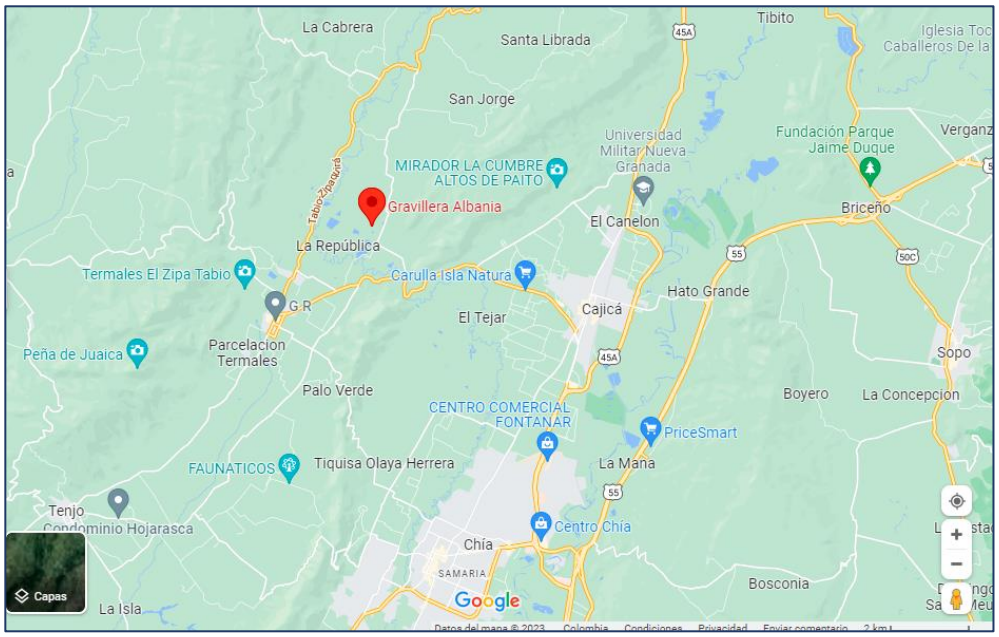
9. PRACTICA EXPERIMENTAL

El proyecto de grado titulado “Evaluación comparativa del método de optimización de la Curva de la Tarántula vs métodos de optimización de Fuller, Mínimos cuadrados y Shilstone en un diseño de mezcla de concreto normal de 21 MPa.”, tiene como fundamento determinar por medio de un análisis comparativo si la mezcla de concreto en estado fresco elaborada mediante la metodología de la curva de la tarántula logra desarrollar una mejor manejabilidad con respecto a los diseños de mezcla convencionales sin perder la resistencia final mínima requerida de 21 MPa exigida por el código Colombiano de Construcción Sismorresistente NSR-10 Título C, de no ser así la información aquí presentada proporcionara Datos técnicos que permitan profundizar en este método durante futuras investigaciones, para cumplir con el Objetivo Principal del trabajo se requiere seguir el siguiente procedimiento:

9.1. Obtención y Características de los Materiales del Diseño

Los agregados utilizados en este estudio fueron adquiridos de la gravilleria Albania S.A. Esta empresa ha extraído el material granular necesario para servir como agregado fino y grueso de una planta de producción ubicada en el municipio de Une (Cundinamarca) por más de 35 años. Albania es una empresa colombiana líder en la producción de agregados pétreos, como gravas y arenas, que son esenciales para la construcción y que satisfacen la demanda de insumos en la Sabana de Bogotá, tanto para clientes públicos como privados. La empresa se ha consolidado como líder en el sector de la construcción gracias a su cumplimiento y compromiso con el medio ambiente y la sociedad. Albania se especializa en la explotación de caliza, balasto, recebo y mineral de hierro, y cuenta con plantas de agregados pétreos y trituración operadas por personal altamente capacitado.

Ilustración 21 Mapa de ubicación lugar de extracción de agregados



Tomado de: Google Maps

9.2. La cantidad de material a utilizar en los ensayos

Debido a que el material disponible debe ser el suficientemente para satisfacer las necesidades del diseño de mezcla y su desperdicio, Se estima que se utilizarán aproximadamente 480kg entre agregados fino, grueso, cemento y agua la siguiente tabla detalla la cantidad usada de materiales para 120 muestras y se determinó después de realizar la dosificación de cada material, explicada más adelante.

Tabla 5
Cantidad de material requerida para 120 muestras

Cantidad de material requerida para 120 muestras	
cemento	78,033
agua	30,381
grava 1	131,328
grava 2	93,111
arena	142,492
total, materiales	475,345

Tomado de: Elaboración propia

9.3. Caracterización de las propiedades mineralógicas de los materiales

La composición fisicoquímica y mineralógica de los materiales fue obtenida de la caracterización detallada realizada directamente por el laboratorio de la planta pedregal y así tener la seguridad de que se cuenta con componentes adecuados y compatibles con los elementos que conforman la mezcla de concreto.

Como el agregado es un componente fundamental para la fabricación del concreto debido a que llena vacíos y reduce el gasto de cemento en la mezcla, se le deben realizar una serie de ensayos teniendo en cuenta la normatividad Colombiana INVIAS y NTC, siendo los objetivos de estudio el agregado fino y el agregado grueso. Ver capítulo cronograma de actividades en donde se menciona cada uno de los ensayos a realizar, además, de describir su propósito, junto la norma técnica. Y se encuentra en los anexos del presente documento.

9.4. Diseños de mezcla

Conociendo las características físicas y mecánicas de los agregados, procedemos a realizar los diseños de mezcla a comparar, para los cuales se espera que desarrollen propiedades de resistencia a la compresión inferiores a los 21 MPa, por lo que a partir de allí se tomará como

base inicial de resultados una serie de muestras las cuales darán indicios de los factores de trabajabilidad en dichos diseños. (Según la bibliografía consultada)

9.5. Fabricación del concreto de prueba

Para identificar las características físicas, mecánicas y el comportamiento en general de cada metodología, se fundirán probetas de concreto sin aditivos a las cuales posteriormente se le realizarán todos los ensayos del concreto en estado fresco basados en el procedimiento descrito en la INVIAS E 402-13

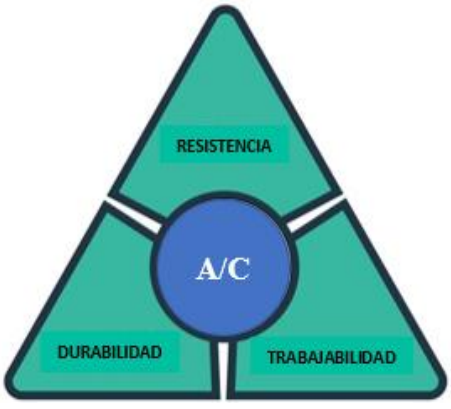
9.6. Reconocimiento de las características generales de los diferentes diseños de mezcla

Con el propósito de identificar las deficiencias del concreto fabricado a partir del diseño de mezcla, ya sea en cuanto a resistencia a la compresión y manejabilidad, se le realizarán Ensayos de Slump o asentamiento a las muestras de concreto además de la prueba de resistencia a la compresión, en donde sus resultados serán tomados como base para las consideraciones y conclusiones de la investigación

10. DISEÑO DE MEZCLA

El proceso de estimación de cantidades adecuadas de materiales para el diseño de mezcla de concreto implica múltiples factores, incluyendo su economía que se basa en la cantidad de cemento por unidad volumétrica consumida, la resistencia que determina la aceptación o rechazo de la mezcla en la construcción de una estructura y es un indicativo de su calidad, la durabilidad que depende de la exposición y ubicación del material, y la trabajabilidad en su estado fresco, que afecta la facilidad de colocación y acabado de los elementos estructurales y el valor de la mano de obra que puede afectar su costo.

Ilustración 22 Diagrama Durabilidad, Resistencia, Manejabilidad, parámetros que dependen de la relación a/c de cualquier concreto estructural.



Tomado de: Elaboración propia

El diseño de mezcla de concreto implica satisfacer los criterios mencionados previamente, es decir, durabilidad, facilidad de manejo y desarrollo de resistencia, mediante la selección de proporciones adecuadas en el diseño de la mezcla.

Cada una de las metodologías contemplan un diseño de mezcla completo, es decir que aparte de seleccionar la cantidad de agregado también se discrimina la cantidad de agua y de cemento, sin embargo, para esta investigación se dejaran esas variables iguales para todos los métodos basados en el ACI 211 puesto que nuestra finalidad es comparar únicamente los resultados de la optimización granulométrica.

10.1. SELECCIÓN DE LA RESISTENCIA DE DISEÑO

El proyecto investigativo está enfocado al diseño de mezcla de concreto con una f´c mínima de 21 MPa, además cuando no se tengan registros de ensayos de resistencia para el cálculo de la desviación estándar debe determinarse según los parámetros normativos de la Norma Técnica Colombiana NTC - 2275 (Procedimiento recomendado para la evaluación de los resultados de los ensayos de resistencia del concreto) junto con lo relacionado en la tabla C.5.3.2.2 de la Norma Sismorresistente del 2010, en este apartado se establece que Si no hay datos disponibles para calcular la desviación estándar de una mezcla de concreto estructural debido a que nunca se ha realizado una mezcla con los materiales descritos anteriormente, se debe utilizar un valor promedio de resistencia a la compresión requerida, denominado f'cr. Este valor se obtiene sumando 8.3 MPa a f´c, que es la resistencia promedio de la mezcla. Este procedimiento se puede consultar en la tabla 6. De esta manera, se determina la resistencia de diseño necesaria como.

Tabla 6

Resistencia promedio a la compresión requerida cunado no hay datos disponibles para establecer una desviación estándar de la muestra

Resistencia especificada a la compresión en, MPa	Resistencia promedio requerida a la compresión, MPa
$f'c < 21$	$f'cr = f'c + 7.0$
$21 \leq f'c \leq 21$	$f'cr = f'c + 8.3$
$f'c > 21$	$f'cr = 1.10f'c + 5.0$

Tomado de: C.5.3.2.2 de la Norma Sismorresistente colombiana del 2010

Resistencia de diseño F'cr

$$f'_c = 21\ MPa$$

$$f'_{cr} = (21 + 8.3)MPa$$

$$f'_{cr} = 29.3\ Mpa$$

10.2. ASENTAMIENTO Y USO DEL CONCRETO

El asentamiento del concreto normal, se encuentra en función del lugar de colocación, el tipo de elemento a fundir, además del método en que este será compactado y colocando en el sitio (vibración, bombeo, baldes entre otras características).

Se pretende que el concreto estructural de peso Normal 21 MPa sea utilizado en la construcción convencional de elementos compactados a mano como pavimentos, losas, muros, y viguetas con recubrimiento de 4 cm, por lo cual el asentamiento utilizado en el diseño de mezcla será determino según la siguiente tabla:

Ilustración 23 asentamientos recomendados según consistencia de la mezcla

Consistencia	Asentamiento (mm)	Ejemplo de tipo de construcción	Sistema de colocación	Sistema de compactación
Muy seca	0-20	Prefabricados de alta resistencia, revestimiento de pantallas de cimentación	Con vibradores de formaleta; concretos de proyección neumática (lanzado)	Secciones sujetas a vibración extrema, puede requerirse presión
Seca	20-35	Pavimentos	Pavimentadoras con terminadora vibratoria	Secciones sujetas a vibración intensa
Semi-seca	35-50	Pavimentos, fundaciones en concreto simple	Colocación con máquinas operadas manualmente	Secciones simplemente reforzadas, con vibración
Media	50-100	Pavimentos compactados a mano, losas muros, vigas	Colocación manual	Secciones medianamente reforzadas, sin vibración
Húmeda	100-150	Elementos estructurales esbeltos	Bombeo	Secciones bastante reforzadas, sin vibración
Muy húmeda	150 o más	Elementos muy esbeltos, pilotes fundidos "in situ"	Tubo-embudo Tremie	Secciones altamente reforzadas, sin vibración. (Normalmente no adecuados para vibrarse)

Tomado de: SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. Tecnología del concreto y del mortero.

El asentamiento de diseño según la tabla anterior debe ser de 3 pulgadas o 7.5 cm, su colocación y compactación se realizará a través de métodos tradicionales como la utilización de baldes y el golpeo de formaletas con martillo de goma para eliminar la segregación en el material lo que incrementa su asentamiento en 1 pulgada, teniendo finalmente:

$$\text{Asentamiento máximo} = 4'' = 10\text{cm}$$
$$\text{Asentamiento de diseño} = 3'' = 7{,}5\text{cm}$$

10.3. SELECCIÓN DEL TAMAÑO MÁXIMO Y TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL

Si el agregado grueso está bien distribuido en distintos tamaños, indica que el concreto tendrá menos espacios vacíos y, por ende, necesitará menos mortero por unidad de volumen. Para conseguir esto, se utiliza un tamaño máximo nominal de ¾'' de pulgada para el agregado. Estos parámetros están descritos en detalle en la NRS-10 TÍTULO C.

El tamaño máximo nominal de una granulometría se describe como el tamiz superior a aquel tamiz que retenga el 15% o más de material y debe cumplir con los siguientes requisitos.

- El tamaño máximo nominal del agregado liviano no debe ser mayor a 1/5 de la menor dimensión de los elementos estructurales.
- La separación mínima del acero de refuerzo de columnas es de 1''.
- El recubrimiento de elementos estructurales que no están sometidos a la intemperie es de 4 cm.

$$Tamaño\ maximo = 1\ {}^{1}/_{2}\ " = 38.1\ mm$$
$$Tamaño\ maximo\ nominal = 1\ " = 25.4\ mm$$

Los datos anteriormente mostrados pueden apreciarse de mejor manera en las secciones 10.8.1 a 10.8.3 granulometría de los agregados.

El siguiente cuadro muestra en resumen los datos iniciales requeridos para la elaboración del diseño de mezcla.

Tabla 7
Parámetros de diseño de mezcla

Parámetros de diseño del concreto de peso normal	
f'cr	29,3 MPa
Asentamiento	4 in= 10cm
Tamaño Max.	1 1/2"= 38.1 mm
Tamaño Max Nom	1 in = 25.4mm
Uso	pavimentos, losas, muros, y viguetas

Tomado de: Elaboración propia

10.4. ELECCIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA

Como se trata de agregados de forma irregular y textura rugosa, por ser de cantera, el concreto no tendrá aire incluido, el tamaño máximo del agregado es de 38.1 mm además de que el asentamiento se prevé en 10.0 cm

Ilustración 24 Requerimiento aproximado de agua de mezclado para diferentes asentamientos y tamaños máximos de agregado con partículas de forma angular y textura rugosa

Asentamiento		Tamaño máximo del agregado, en mm (pulg.)							
		9.51 ¾"	12.7 ½"	19.0 ¾"	25.4 1"	38.1 1½"	50.8 2"	64.0 2½"	76.1 3"
mm	pulg	Agua de mezclado, en Kg/m³ de concreto							
0	0	223	201	186	171	158	147	141	132
25	1	231	208	194	178	164	154	147	138
50	2	236	214	199	183	170	159	151	144
75	3	241	218	203	188	175	164	156	148
100	4	244	221	207	192	179	168	159	151
125	5	247	225	210	196	183	172	162	153
150	6	251	230	214	200	187	176	165	157
175	7	256	235	218	205	192	181	170	163
200	8	260	240	224	210	197	186	176	168

Tomado de: SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. Tecnología del concreto y del mortero.

Realizando la lectura de la tabla anterior se aprecia que para un asentamiento de 3" y un tamaño máximo de 1 ½" se requiere una cantidad de agua igual a 175kg/m3

$$Cantidad\ de\ agua = 175\ kg/m^3$$

10.5. ESTIMACIÓN APROXIMADA DE LA RELACIÓN A/C

Una vez calculada la cantidad de agua para la mezcla de concreto normal procedemos determinar la relación a/c con que se trabajar utilizando la siguiente tabla:

Ilustración 25 Relación Agua cemento según la resistencia ultima a la compresión

Resistencia a la compresión kg/cm²	Relación agua-cemento en peso		
	Límite superior	Línea media	Límite inferior
140	-	0.72	0.65
175	-	0.65	0.58
210	0.70	0.58	0.53
245	0.64	0.53	0.49
280	0.59	0.48	0.45
315	0.54	0.44	0.42
350	0.49	0.40	0.38

Tomado de: SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. Tecnología del concreto y del mortero.

Los valores de la tabla no nos entregan los valores de relación agua cemento para una resistencia de diseño requerida fc'r de 293 MPa por lo que se realiza una interpolación de los valores obteniendo una relación agua cemento igual a.

$$relación\ {}^{a}/_{c} = 0.465$$

Una relación a/c de 0.465 será el punto de partida para decidir si el concreto fabricado a partir de agregado grueso y fino alcanza una resistencia de diseño f'c superior a los 21 MPa.

10.6. ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE CEMENTO

Una vez conocida la Relación agua cemento y el contenido de agua es posible determinar el contenido de cemento mediante la anteriormente mencionada ecuación 1:

$$0.465 = \frac{A}{C}$$

Despejando c

$$Contenido\ de\ cemento = \frac{175}{0.465} = 376.34\ Kg/m^3$$

10.7. DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN DE AGREGADOS PRESENTES EN 1 M3 DE CONCRETO

Sabiendo que para la fabricación de muestras de prueba de concreto se debe inicialmente conocer un estimativo aproximado de las proporciones requeridas en el diseño de mezcla los materiales que se mantendrán constantes serán.

Tabla 8
Resumen de materiales para el diseño inicial estimado

Material	Volumen (m^3)	Peso (Kg)	Densidad (Kg/m^3)
Cemento	0.1214	376,34	3100
Agua	0.175	175	1000
Aire	0.02		

Tomado de: Elaboración Propia

10.8. Granulometría de los Materiales

Con el fin de comparar los diferentes métodos de optimización de agregados frente al método de la curva de la tarántula, se hace necesario conocer la granulometría de los agregados gruesos y fino; para esto se utilizarán 3 materiales de diferentes tamaños (Arena, Grava y Gravilla) proveniente de la planta el pedregal ver anexo.

Lo anterior debido a que los métodos que funcionan mediante el cálculo de los porcentajes retenidos requieren de una mayor gradación del conjunto de partículas de todos los agregados de la mezcla se hace necesario incluir un tercer material de tamaño intermedio a la mezcla y así poder trazar visiblemente los gráficos para los métodos de Shilstone y curva de la tarántula

10.8.1. Granulometría de la Grava

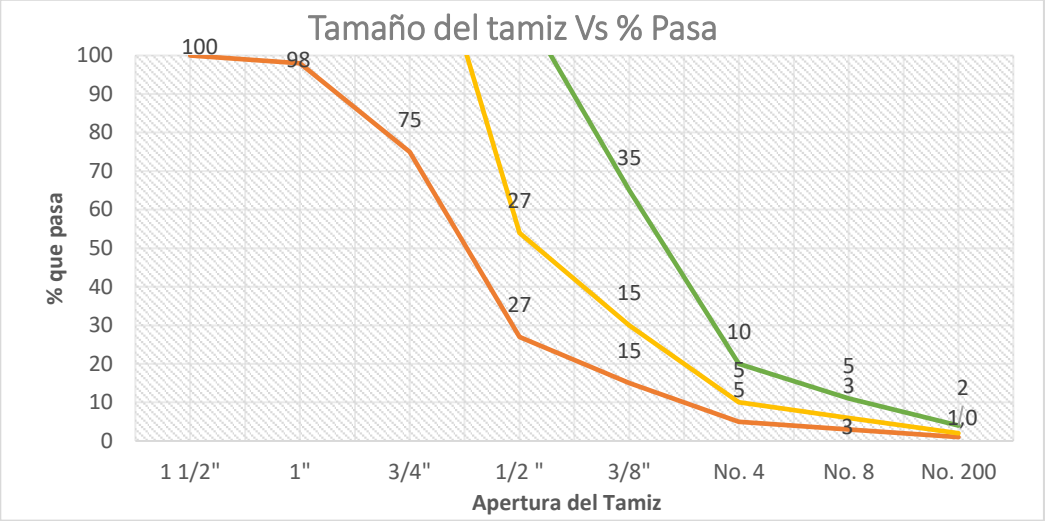
El tamaño de este material varía entre el tamiz # 200 y el tamiz de 1 1/2” según se aprecia en la siguiente tabla

Tabla 9
Granulometría grava

Granulometría Grava						
Peso total muestra (g)		7365.5	Peso seco (g)		7152.1	
Tamiz	Apertura mm	Peso retenido	% Retenido individual	% que pasa	ESPECIFICACIONES Min	Max
1 1/2"	37.5	-	0.0	100	**100**	**100**
1"	25	137.0	1.9	98	**95**	**100**
3/4"	19	1684.2	23.5	75	**60**	**80**
1/2 "	12.5	3396.0	47.5	27	**25**	**60**
3/8"	9.5	830.7	11.6	15	**13**	**35**
No. 4	4.75	761.3	10.6	5	**0**	**10**
No. 8	2.38	102.0	1.4	3	**0**	**5**
No. 200	0.075	165.9	2.3	1.0	**0**	**2**
Fondo		5.9				
Total	110.7	7,083.0				

Tomado de: Elaboración Propia

Ilustración 26 Curva granulométrica grava



Tomado de: Elaboración Propia

10.8.2. Granulometría de la Gravilla

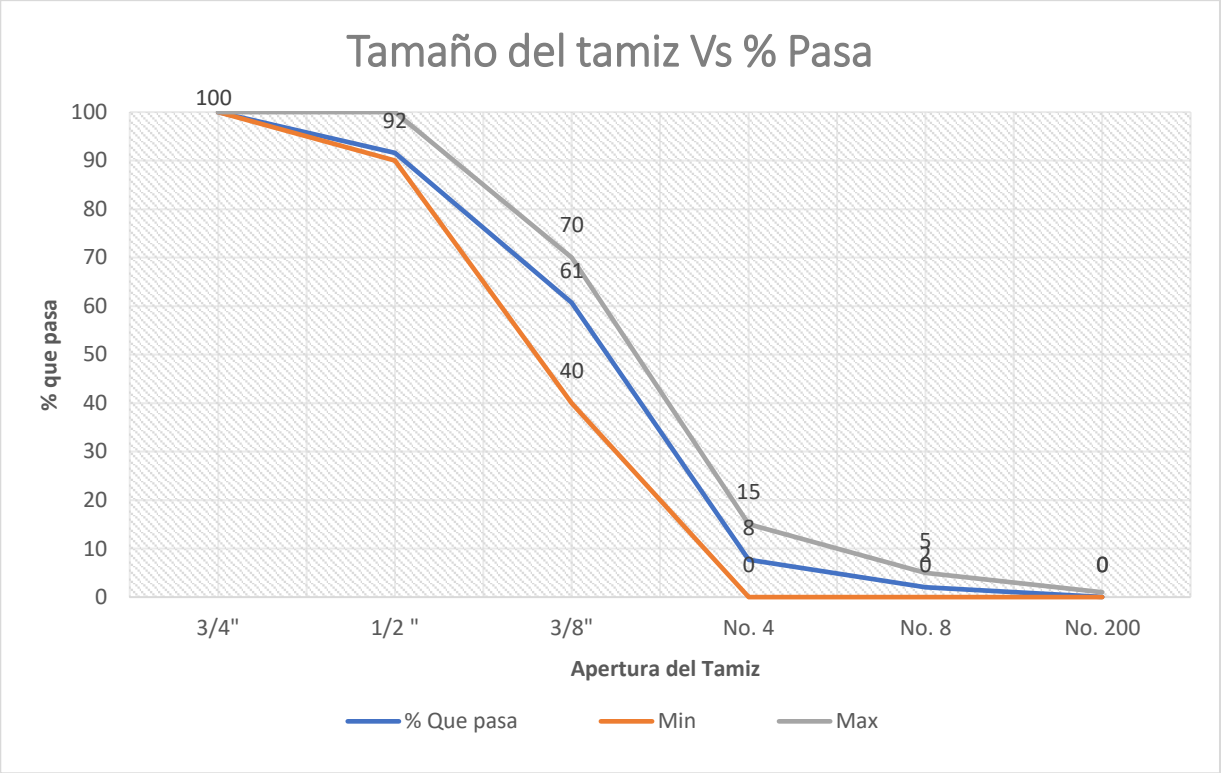
Se ha denominado como gravilla o grava No 2 al agregado intermedio cuyo tamaño comprende partículas entre el tamiz # 200 y el tamiz de 3/4" según se aprecia en la siguiente tabla.

Tabla 10
Granulometría gravilla

Granulometría Gravilla							
Peso total muestra (g)		7365,5	Peso seco (g)			7152,1	
Tamiz	Apertura	Peso retenido	% Retenido individual	% acumulado	% que pasa	**Tolerancia NTC 174**	
	mm					Min	Max
3/4"	19	0,0	0,00	0,0	100	**100**	**100**
1/2 "	12,5	186,1	8,38	8,4	92	**90**	**100**
3/8"	9,5	686,8	30,94	39,3	61	**40**	**70**
No. 4	4,75	1175,4	52,95	92,3	8	**0**	**15**
No. 8	2,36	126,1	5,68	98,0	2	**0**	**5**
No. 200	0,000	44,9	2,02	100,0	0	**0**	**1**
Fondo		0,6	0,03				
Total	48,1	2.219,9					

Tomado de: Elaboración Propia

Ilustración 27 Curva Granulométrica gravilla



Tomado de: Elaboración Propia

10.8.3. Granulometría de la Arena

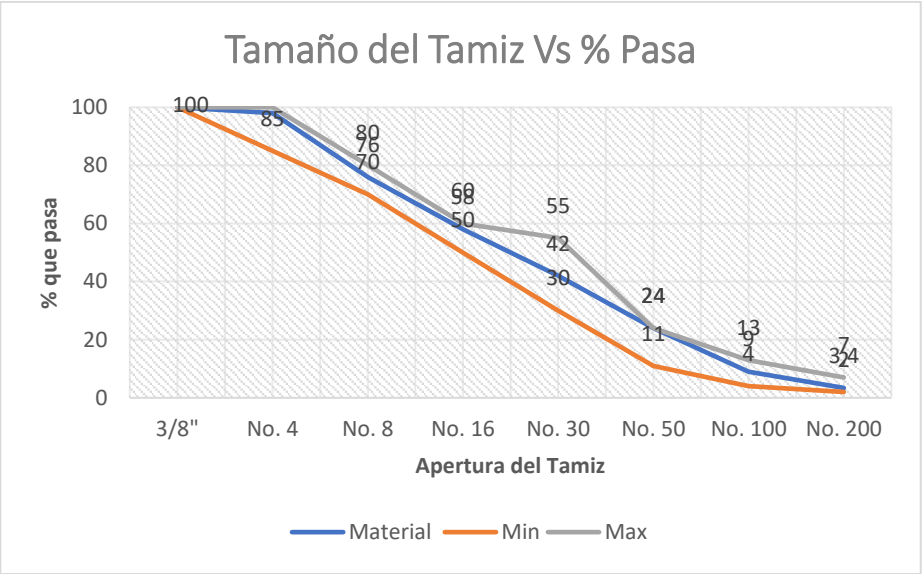
Se ha denominado como gravilla o grava No 2 al agregado intermedio cuyo tamaño comprende partículas entre el tamiz # 200 y el tamiz de 3/4" según se aprecia en la siguiente tabla

Tabla 11
Granulometría Arena

Granulometría Arena							
Peso total muestra (g)		1522.6	Peso seco (g)			1410.3	
Tamiz	Apertura mm	peso retenido	% Retenido individual	% acumulado	% que pasa	**Tolerancia NTC 174**	
						Min	**Max**
3/8"	9.5	1.8	0.1	0.1	100	100	100
No. 4	4.75	25.4	1.8	1.9	98	85	100
No. 8	2.36	311.4	22.1	24.0	76	70	80
No. 16	1.18	260.4	18.5	42.5	58	50	60
No. 30	0.60	224.8	15.9	58.4	42	30	55
No. 50	0.30	245.0	17.4	75.8	24	11	24
No. 100	0.15	218.5	15.5	91.3	9	4	13
No. 200	0.075	74.5	5.3	96.6	3.4	2	7
Fondo		10.8	0.8				
Total		1,372.6					

Tomado de: Elaboración Propia

Ilustración 28 Curva Granulométrica arena



Tomado de: Elaboración Propia

10.9. PRINCIPIOS DE OPTIMIZACION

Para la aplicación de los métodos de optimización granulométrica se establecieron parámetros que permanecerán constantes de acuerdo a la granulometría obtenida del material, dicho esto se describen a continuación los valores del diseño de mezcla que no cambiarán, puesto que solo se busca la optimización de los agregados finos y gruesos mediante los métodos de, Fuller, mínimos cuadrados Shilstone y la Curva de la tarántula.
El módulo de finura de la arena es de, 2.9, el tamaño máximo del material es de 1 ½", el tamaño máximo nominal es de 1", el contenido de agua es de 175 Lt o 0.175 m3, la resistencia promedio a la compresión es de 29.3 MPa, la relación agua cemento es de 0.465, el contenido de cemento es de 376 Kg/m3 o 0.121 m3; el diseño de mezcal se realiza mediante metodología ACI -211

Ilustración 29
Valores de materiales que permanecen constantes en el diseño de mezcla

Material	Volumen (m^3)	Peso (Kg)	Densidad (Kg/m^3)
Cemento	0.121	376	3100
Agua	0.175	175	1000
Aire	0.015		
Grava	determinado según		
Arena	método de optimización		
Total	1		

Tomado de: Elaboración Propia

Relacionando los resultados de dosificación de materiales en la tabla anterior, podemos decir que el volumen de agregados para un metro cubico de concreto será de 0.689 m^3.

10.9.1. PRINCIPIO DE OPTIMIZACIÓN POR FULLER

Los estudios realizados por W. Fuller y S.E Thompson en 1907 les permitieron generar una curva granulométrica ideal de los agregados de una mezcla de concreto. La curva está dada por la ecuación:

Ecuación 19

$$y = 100 \times \left(\frac{d}{D}\right)^{n}$$

Donde:
"Y" es el porcentaje en peso que pasa por cada uno de los tamices de abertura "d".
"d" la abertura de los tamices empleados en mm
"D" el tamaño máximo del agregado en mm
"n" es 0.5 para el caso de la curva de Fuller

El método es recomendado para cantidades de cemento mayores a 300Kg por metro cubico de concreto, tamaño máximo de agregado menores a 70mm o 3" y agregados redondeados

Como lo menciona Giraldo, existen dos metodologías para obtener el porcentaje de la dosificación de los agregados, un método por tanteo, más rápido, el cual pretende que la curva de los agregados de una mezcla se ajuste de una manera adecuada a la curva de referencia de Fuller. Y la metodología en la cuál a través de los módulos de finura de los agregados a usar en una mezcla de concreto y módulos de finura ideales para el tamaño máximo de Fuller, el cual no es más que la abertura del menor tamiz en el que se retiene del 5 a 15 % del árido de mayor dimensión (Grava), se usan procedimientos matemáticos donde se obtiene el porcentaje de los agregados a utilizar. Para el desarrollo de este trabajo se utilizará la metodología de los módulos de finura, ya que es más preciso en los resultados, sin embargo, se expondrán los resultados de las dos metodologías.

10.9.1.1. Método Fuller por tanteo

Tal y como Como se expuso en el apartado 6.2.10.1.1 se presenta la gráfica de Fuller realizada mediante la modalidad de tanteo para los tres tipos agregados recordando que deberán unirse mediante una recta los agregados mínimos y máximo de agregados continuos.

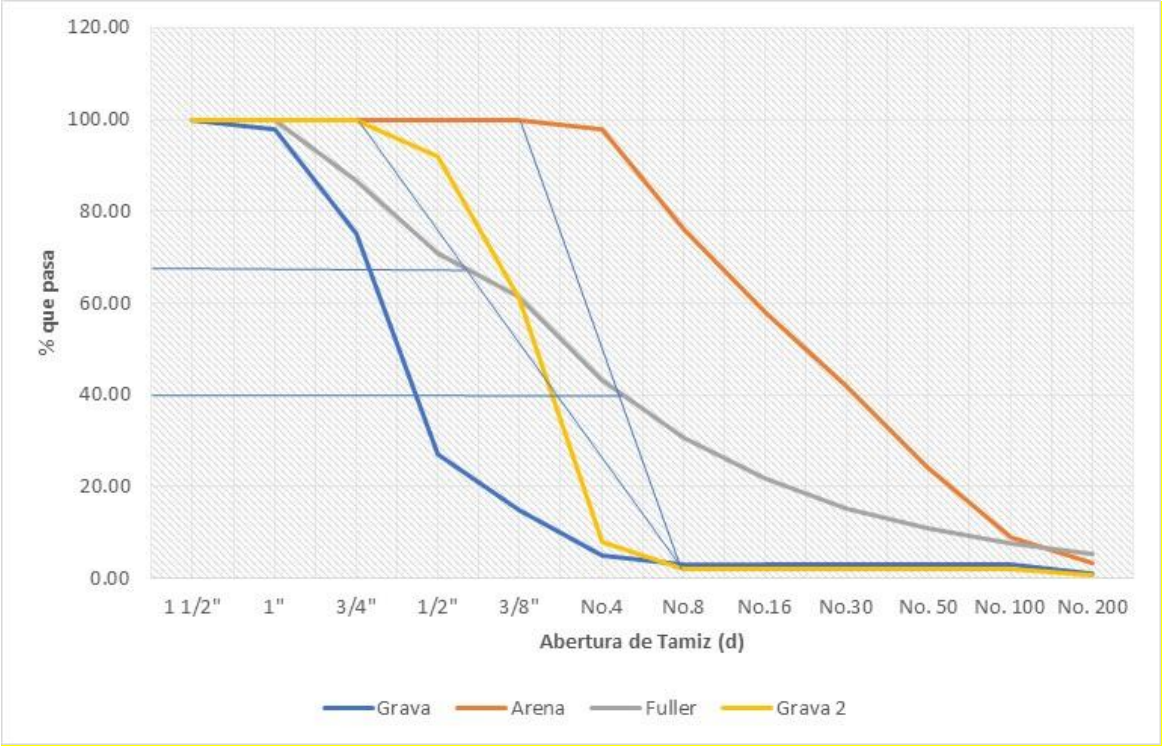
Ilustración 30
Análisis Granulométrico por método de Fuller para tres tipos de agregados

ANALISIS GRANULOMETRICO				Fuller
tamiz	% pasa			
	grava 1	grava 2	arena	
1 1/2"	100,00	100,00	100,00	100,00
1"	98,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	75,00	100,00	100,00	86,72
1/2"	27,00	92,00	100,00	70,71
3/8"	15,00	61,00	100,00	61,19
No.4	5,00	8,00	98,00	43,29
No.8	3,00	2,00	76,00	30,61
No.16	3,00	2,00	58,00	21,64
No.30	3,00	2,00	42,00	15,31
No. 50	3,00	2,00	24,00	10,81
No. 100	3,00	2,00	9,00	7,66

No. 200	1,00	0,60	3,40	5,43

Tomado de: Elaboración Propia

Ilustración 31 Método de Fuller por tanteos para los tres agregados del diseño de mezcla



Tomado de: Elaboración Propia

De la gráfica se obtiene:

$$porcentaje\ de\ volumen\ de\ grava\ No1 = 32\%$$
$$porcentaje\ de\ volumen\ de\ grava\ No2 = 28\%$$
$$porcentaje\ de\ volumen\ de\ arena = 40\%$$

Teniendo en cuenta que el volumen total de los agregados debe ser igual a 0.689 m³ para un metro cubico de concreto, el volumen de los agregados seria:

$$volumen\ de\ grava\ No1 = 0.32 \times 0.689 = 0.220\ m^3$$
$$volumen\ de\ grava\ No2 = 0.28 \times 0.689 = 0.193\ m^3$$
$$volumen\ de\ arena = 0.40 \times 0.689 = 0.275\ m^3$$

10.9.1.2. Método Fuller por módulos de finura

Con los datos de módulos de finura obtenidos en la granulometría de la arena y grava además de la metodología vista en el numeral 6.2.10.1.2 y el uso de las ecuaciones 3 a 7 hallamos los datos para el tamaño máximo nominal de Fuller de nuestros agregados, en este caso 1".

Tabla 12

Porcentajes pasa ideales teoría de Fuller y módulos de finura de Fuller para cada tamiz

tamiz d		D						
		Pulgadas	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N°4
mm	pulgadas	mm	38.1	25.4	19.1	12.7	9.51	4.76
38.1	1 1/2"	→	100.00					
25.4	1"	→	81.65	100.00				
19.1	3/4"	→	70.80	86.72	100.00			
12.7	1/2"	→	57.74	70.71	81.54	100.00		
9.51	3/8"	→	49.96	61.19	70.56	86.53	100.00	
4.76	No. 4	→	35.35	43.29	49.92	61.22	70.75	100.00
2.38	No. 8	→	24.99	30.61	35.30	43.29	50.03	70.71
1.19	No. 16	→	17.67	21.64	24.96	30.61	35.37	50.00
0.595	No. 30	→	12.50	15.31	17.65	21.64	25.01	35.36
0.297	No. 50	→	8.83	10.81	12.47	15.29	17.67	24.98
0.149	No. 100	→	6.25	7.66	8.83	10.83	12.52	17.69
0.075	No. 200		4.44	5.43	6.27	7.68	8.88	12.55
		MFF	5.74	5.23	4.80	4.31	3.89	3.01

Tomado de: Elaboración Propia

Debido a que el módulo de finura de Fuller ideal para un agregado con tamaño máximo nominal es de 1” se obtiene la siguiente de la ecuación 4 el despeje para la grava No1:

$$MFFg1 = \frac{\sum \%\, Ret.acum.I \left(\frac{3}{4}^{"} + \frac{3}{8}^{"} + N°4 + N°8 + N°16 + N°30 + N°50 + N°100\right)}{100}$$

$$MFF\ g1 = (\sum\ 〚((100-100)+(100-86.72)+(100-61.19)+(100-43.29)+(100-30.61)+(100-21.64)+(100-15.31)+(100-10.81)+(100-7.66))〛)/100$$

$$MFF_{g1} = 5.23$$

Repitiendo el procedimiento se encuentran los Módulos de Finura de la grava No2 y la arena:

$$MFF_{g1} = 6.90$$

$$MFF_{g2} = 6.21$$

$$MFF_{a} = 2.94$$

Una vez encontrados los Módulos de Finura de Fuller se continúa hallando el porcentaje mediante la ecuación 7 para la composición para cada uno de los agregados si:

$$t_1 + t_2 = 100 \times \frac{MF_{grava1} - MFF_{grava1}}{MF_{grava\,1} - MFF_{grava\,2}}$$

$$t_1 + t_2 = 100 \times \frac{6.90 - 5.23}{6.90 - 4.31} = 64{,}46$$

Arena.

$$t_1 = (t_1 + t_2) \times \frac{MF_{g2} - MFF_{g2}}{MF_{g2} - MF_a}$$

$$t_1 = 37.56\,\%$$

Grava No1.

$$t_2 = (t_1 + t_2) - t2 = 64.46\,\% - 37.56\% = 26.91\%$$

Grava No2.

$$t_3 = 100 - (t_1 + t_2) = 100\% - 64.46\,\% = 35.54\%$$

Expresando los resultados en términos de volumen

$$volumen\ de\ grava\ No1 = 0.245\ m^3$$
$$volumen\ de\ grava\ No2 = 0.185\ m^3$$
$$volumen\ de\ arena = 0.259\ m^3$$

Por lo tanto:

Tabla 13
Valores en peso y volumen para el método de Fuller mediante el uso de módulos de finura y el uso de tanteo

Por Tanteo				Por Módulo de finura			
Volumen grava1 m3	0,220	Peso Grava1 Kg/m3	565	Volumen grava1 m3	0,245	Peso Grava Kg/m3	627
Volumen grava2 m43	0,193	Peso Grava2 Kg/m4	492	Volumen grava2 m3	0,185	Peso Grava2 Kg/m3	472
Volumen Arena m3	0,275	Peso Arena Kg/m3	713	Volumen Arena m3	0,259	Peso Arena Kg/m3	669
sumatoria	0,689			sumatoria	0,689		

Tomado de: Elaboración Propia

Dado que los agregados gruesos y finos en su estado natural contienen humedad que puede afectar la relación agua-cemento previamente establecida y tener un impacto significativo en la resistencia a la compresión después de 28 días, y considerando que estos materiales se mezclarán con humedad interna, es necesario reducir dicha humedad siguiendo los siguientes pasos:

Peso de agregado grueso grava en estado natural

$$(1.24\% \times 627) + 627 = 634.99Kg$$

Cantidad total de agua presente en el agregado grueso gravilla

$$634.99 - 627 = 7.78\ Kg$$

Peso de agregado grueso gravilla en estado natural

$$(1.36\% \times 472) + 472 = 478.88Kg$$

Cantidad total de agua presente en el agregado grueso gravilla

$$478.88 - 472 = 6.43Kg$$

Peso de agregado fino en estado natural

$$(3\% \times 669) + 669 = 689.08\ Kg$$

Cantidad total de agua presente en el agregado fino

$$689.08 - 669 = 20.07\ Kg$$

Finalmente, la cantidad de agua a reducir es de:

$$7.78 + 6.43 + 20.07 = 34.28\ Kg$$

$$175 - 34.28 = 140.72\ Kg$$

Con relación a lo anterior las cantidades de materiales solicitadas para el diseño de mezcla son las siguientes:

Tabla 14
Cantidades utilizadas en el diseño de mezcla para 1 m3 de concreto (agregados en estado húmedo)

Método de Fuller	
cemento	376.34Kg
agua	140.73Kg
grava 1	635Kg
grava 2	478.88Kg
arena	689.08Kg

Tomado de: Elaboración Propia

10.9.2 PRINCIPIO DE OPTIMIZACIÓN POR MÍNIMOS CUADRADOS

Como lo menciona Olaya el método es útil para optimizar dosificaciones de árido los cuales se acerquen a leyes como:

Ecuación 20

$$A_i = \left(\frac{d_i}{D}\right)^n$$

Tal es el caso de los métodos de Fuller, Bolomey. Rothfuchs. Hummel. Entre otros.
donde:
Ai = % de árido (volumen) que pasa por el tamiz de luz d.
di = luz del tamiz (mm):
D = tamaño máximo del árido;
n = exponente (en general fraccionario).

Tal y como se presentó anteriormente en el apartado 6.2.10.2 de este documento se realiza el Ajuste a curva de Fuller.

Tabla 15
Análisis Granulométrico por método de mínimos cuadrados

ANALISIS GRANULOMETRICO					
Tamiz	d	% pasa			
		grava1	grava 2	arena	Fuller
		X3	X2	X1	Cj
No. 200	d1	1,00	0,60	3,40	5,43
No. 100	d2	3,00	2,00	9,00	7,66
No. 50	d3	3,00	2,00	24,00	10,81
No.30	d4	3,00	2,00	42,00	15,31
No.16	d5	3,00	2,00	58,00	21,64
No.8	d6	3,00	2,00	76,00	30,61
No.4	d7	5,00	8,00	98,00	43,29
3/8"	d8	15,00	61,00	100,00	61,19
1/2"	d9	27,00	92,00	100,00	70,71
3/4"	d10	75,00	100,00	100,00	86,72
1"	d11	98,00	100,00	100,00	100,00
1 1/2"	d12	100,00	100,00	100,00	100,00
MFF		5,23	4,31	3,01	5,23
MF		6,90	6,21	2,94	

Tomado de: Elaboración Propia

Una vez obtenida la granulometría se procede a arreglar el sistema de ecuaciones a utilizar:

Tabla 16
Sistema de ecuaciones

SISTEMA DE ECUACIONES										
3,40	X1	+	0,60	X2	+	1,00	X3	-	5,43	=	r1
9,00	X1	+	2,00	X2	+	3,00	X3	-	7,66	=	r2
24,00	X1	+	2,00	X2	+	3,00	X3	-	10,81	=	r3
42,00	X1	+	2,00	X2	+	3,00	X3	-	15,31	=	r4
58,00	X1	+	2,00	X2	+	3,00	X3	-	21,64	=	r5
76,00	X1	+	2,00	X2	+	3,00	X3	-	30,61	=	r6
98,00	X1	+	8,00	X2	+	5,00	X3	-	43,29	=	r7
100,00	X1	+	61,00	X2	+	15,00	X3	-	61,19	=	r8
100,00	X1	+	92,00	X2	+	27,00	X3	-	70,71	=	r9
100,00	X1	+	100,00	X2	+	75,00	X3	-	86,72	=	r10
100,00	X1	+	100,00	X2	+	98,00	X3	-	100,00	=	r11
100,00	X1	+	100,00	X2	+	100,00	X3	-	100,00	=	r12

Tomado de: Elaboración Propia

Realizando la operación de resta a los coeficientes a 2 se obtiene

Tabla 17
resultado de operaciones mínimos cuadrados

2,40	X1	+	0	-	4,43	=	r1
6,00	X1	+	0	-	4,66	=	r2
21,00	X1	+	0	-	7,81	=	r3
39,00	X1	+	0	-	12,31	=	r4
55,00	X1	+	0	-	18,64	=	r5
73,00	X1	+	0	-	27,61	=	r6
93,00	X1	+	3	-	38,29	=	r7
85,00	X1	+	46	-	46,19	=	r8
73,00	X1	+	65	-	43,71	=	r9
25,00	X1	+	25	-	11,72	=	r10
2,00	X1	+	2	-	2,00	=	r11
0,00	X1	+	0	-	0,00	=	r12

Tomado de: Elaboración Propia

Con el fin de hallar el valor de x1 se despeja la ecuación.

$$\left[\underline{a_1}, \underline{a_1}\right] x_1 - \left[\underline{c_1}, \underline{a_1}\right] = 0$$

Para esto debemos calcular

$$\left[\underline{a_1}, \underline{a_1}\right] \; y \; \left[\underline{c_1}, \underline{a_1}\right]$$

$$\left[\underline{a_1}, \underline{a_1}\right] = \sum_{k=1}^{m} \left[\underline{a_k}1 \times \underline{a_k}1\right]$$

$$= \underline{a_{11}} \times \underline{a_{11}} + \underline{a_{21}} \times \underline{a_{21}} + \cdots + \underline{a_{i1}} \times \underline{a_{i1}}$$

$$= 2.4^2 + 6^2 + 21^2 + 39^2 + 55^2 + 73^2 + 93^2 + 85^2 + 73^2 + 25^2 + 2^2 + 0^2$$

$$b_{11} = 32189.76$$

$$\left[\underline{c_1}, \underline{a_1}\right] = \sum_{k=1}^{m} \left[\underline{c_k} \times \underline{a_k}1\right]$$

$$= \underline{c_1} \times \underline{a_{11}} + \underline{c_2} \times \underline{a_{21}} + \cdots + \underline{c_i} \times \underline{a_{i1}}$$

$$= (4.43 \times 2.40) + (4.66 \times 6) + (7.81 \times 21) + (12.31 \times 39) + (18.64 \times 55) + (27.61 \times 73) + (38.29 \times 93) + (46.19 \times 85) + (43.71 \times 73) + (11.72 \times 25) + (2 \times 2.) + (0 \times 0)$$

$$d_1 = 14698.44$$

De la misma manera se hallan los demás coeficientes resolviendo las ecuaciones 10 a 14

Tabla 18

Coeficientes intermedios para obtener los porcentajes de agregado requeridos

b11	32189,76
b12	9563,00
b22	6979,00
d1	14698,44
d2	5377,66

Tomado de: Elaboración Propia

Por lo tanto

$$b_{11}x_1 - d_1 = 0$$

$$z_1 = \frac{d_1}{b_{12}}$$

$$z_1 = \frac{14698{,}44}{9563{,}00}$$

$$z_1 = 1.54$$

$$x_1 = \frac{b_{11}}{b_{12}}$$

$$z_1 = \frac{32189.76}{9563{,}00}$$

$$z_1 = 3{,}37$$

$$x_1 = 38.4\%\ de\ arena$$

Para obtener el porcentaje de grava No1

$$z_2 = \frac{d_1}{b_{11}}$$

$$z_2 = \frac{32189.76}{14698,44}$$

$$z_2 = 1.54$$

$$x_2 = \frac{b_{11}}{b_{12}}$$

$$z_2 = \frac{32189.76}{9563,00}$$

$$x_2 = 3,37$$

$$x_2 = 24.4\%\ de\ grava\ No1$$

Para obtener el porcentaje de grava No2

$$x_1 + x_2 + x_3 = 1$$

$$x_3 = 1 - x_1 - x2$$

$$x_3 = 1 - 0.384\ - 0.244\ = 0.372$$

$$x_3 = 37.2\%\ de\ grava\ No2$$

De igual manera se obtienen los demás factores

Tabla 19
Valores calculados de porcentaje de agregados

X1	38,4%	Arena
X2	24,4%	Grava2
X3	37,2%	Grava1

Tomado de: Elaboración Propia

En resumen:

Tabla 20
Volumen y peso de agregados por mínimos cuadrados

Volumen y Peso Por Mínimos cuadrados			
Volumen grava1 m3	0,256	Peso Grava1 Kg/m3	656
Volumen grava2 m3	0,168	Peso Grava2 Kg/m3	429
Volumen Arena m3	0,264	Peso Arena Kg/m3	684
Sumatoria		0,689	

Tomado de: Elaboración Propia

Dado que los agregados gruesos y finos en su estado natural contienen humedad que puede afectar la relación agua-cemento previamente establecida y tener un impacto significativo en la resistencia a la compresión después de 28 días, y considerando que estos materiales se mezclarán con humedad interna, es necesario reducir dicha humedad siguiendo los siguientes pasos:

Peso de agregado grueso grava en estado natural

$$(1.24\% \times 656) + 656 = 664.03Kg$$

Cantidad total de agua presente en el agregado grueso gravilla

$$664.03 - 656 = 8.13\ Kg$$

Peso de agregado grueso gravilla en estado natural

$$(1.36\% \times 429) + 429 = 434.85Kg$$

Cantidad total de agua presente en el agregado grueso gravilla

$$434.85 - 429 = 5.83Kg$$

Peso de agregado fino en estado natural

$$(3\% \times 684) + 684 = 704.64\ Kg$$

Cantidad total de agua presente en el agregado fino

$$704.64 - 684 = 20.52\ Kg$$

Finalmente, la cantidad de agua a reducir es de:

$$8.13 + 5.83 + 20.52 = 34.48\ Kg$$

$$175 - 34.48 = 140.51\ Kg$$

Con relación a lo anterior las cantidades de materiales solicitadas para el diseño de mezcla son las siguientes:

Tabla 21
Cantidades utilizadas en el diseño de mezcla para 1 m3 de concreto (agregados en estado húmedo)

Método de Mínimos cuadrados	
cemento	376.34Kg
agua	140.73Kg
grava 1	664.03Kg
grava 2	434.85Kg
arena	704.64Kg

Tomado de: Elaboración Propia

10.9.3. PRINCIPIO DE OPTIMIZACIÓN POR SHILSTONE

Debido a que esta metodología se realiza mediante la utilización de los porcentajes combinados retenidos para el cálculo de los limites admisibles según se había expuesto en el apartado 6.2.10.3 del presente documento se presenta a continuación la granulometría combinada de los 3 agregados a usar en el diseño de mezcla, también se presenta gráficamente en la carta de porcentaje retenido ilustración 32

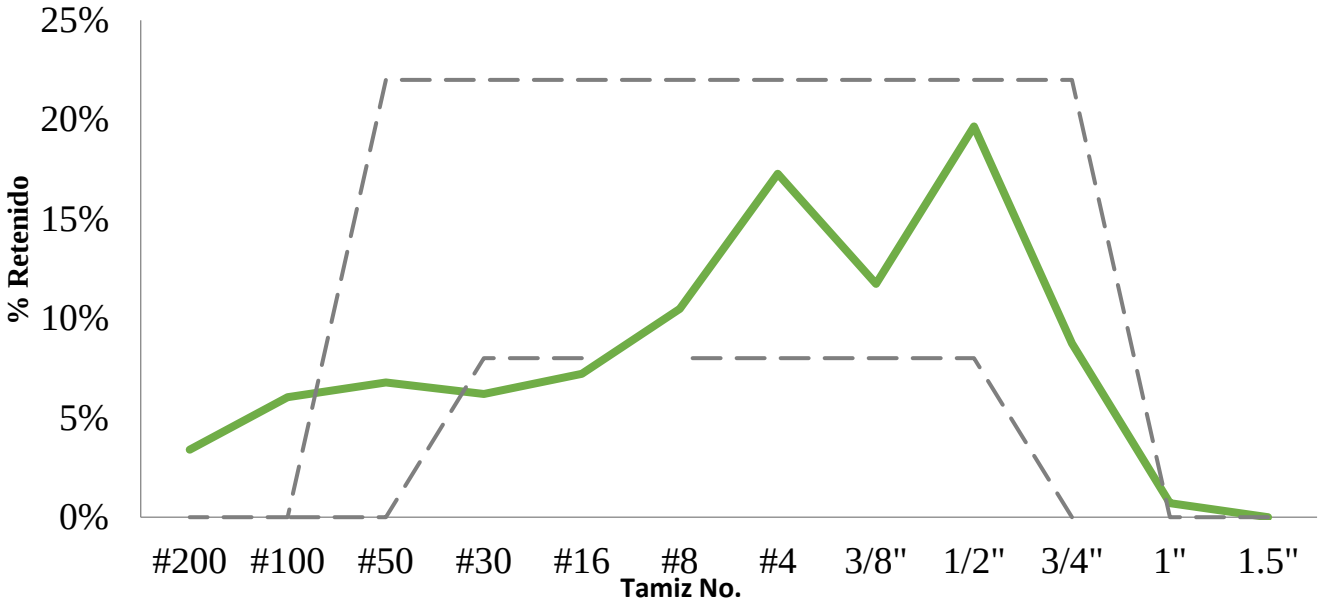
Tabla 22
Granulometría combinada usando carta de porcentaje retenido de Shilstone.

Tamiz	Combinado % Pasa	Combinado % retenido	Máximo limite	Mínimo limite	Cumple
1.5"	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	**si**
1"	99,30%	0,70%	0,00%	0,00%	**no**
3/4"	90,63%	8,67%	22,00%	0,00%	**si**
1/2"	71,07%	19,56%	22,00%	8,00%	**si**
3/8"	59,23%	11,84%	22,00%	8,00%	**si**
#4	41,76%	17,47%	22,00%	8,00%	**si**
#8	31,28%	10,47%	22,00%	8,00%	**si**
#16	24,11%	7,18%	22,00%	8,00%	**no**
#30	17,93%	6,17%	22,00%	8,00%	**no**
#50	11,18%	6,75%	22,00%	0,00%	**si**
#100	5,17%	6,02%	0,00%	0,00%	**no**
#200	1,77%	3,40%	0,00%	0,00%	**no**
	total	98,23%	Volumen de	agregado	0,667m3

grava I	37%
grava II	24%
arena I	39%

Tomado de: Elaboración Propia

Ilustración 32 Gráfico de porcentaje retenido en cada una de las mallas



Tomado de: Elaboración Propia

Siguiendo la metodología de Shilstone se deberán calcular los coeficientes a partir de la gradación de los áridos los cuales se usarán para determinar la trabajabilidad de la mezcla de concreto. Estos factores relacionan las partículas gruesas e intermedias del árido expresada en porcentaje, donde surge lo siguiente:

- Q= 100 – porcentaje que pasa la malla 10 mm o 3/8”

Entonces:

Q= 100 – 59,23% = 40,77%

- I = porcentaje que pasa malla 10 mm o 3/8” - porcentaje pasa malla N° 8

Entonces:

I= 59,23% - 31,28% = 27,95%

- FG = Factor Grueso

$$FG = \frac{Q}{Q + I} \times 100$$

$$FG = \frac{100 - 59.23}{(100 - 59.23) + 27,95} \times 100 = 59.33\%$$

- FT = Factor de trabajabilidad

Se puede definir como el porcentaje de áridos que pasan por el tamiz N°8 al que debe hacerse una corrección por contenido de cemento

$$FT = W + \left(\frac{2.5(c - 335)}{56}\right)$$

Dónde:

- W = corresponde al % de material que pasa la malla N°8

Entonces:

W= 31,28%

- C = contenido de cemento en kilogramos, de apartados anteriores, conocemos que el contenido de concreto es:

C=376 Kg/m3

$$FT = 31.28 + \left(\frac{2.5\ (376 - 335)}{56}\right) x\ 100 = 33.13\%$$

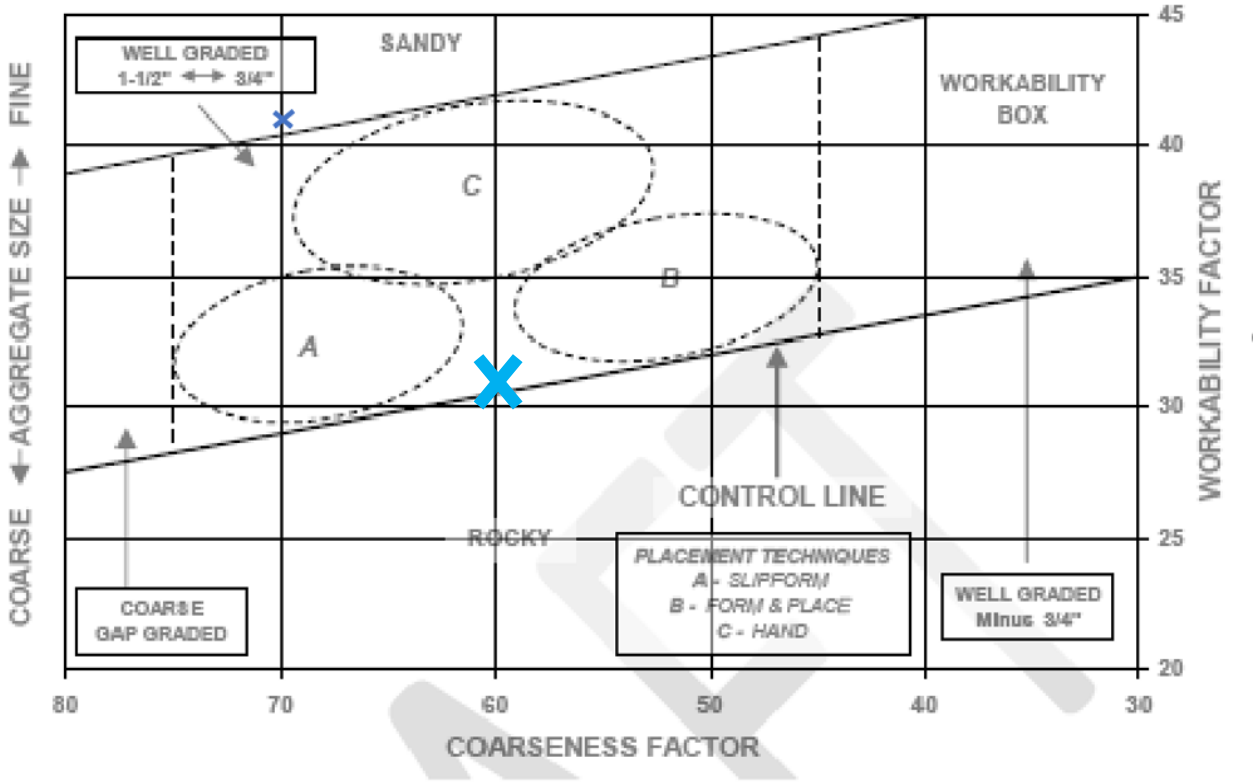
Tabla 23
Resumen de valores teóricos Del método de Shilstone

Q	40.77%
I	27.95%
FT	33.13
FG	59.33

Tomado de: Elaboración Propia

Una vez encontrados los valores teóricos para los factores FG y FT se entra a la siguiente tabla con el fin de predecir las características de la mezcla.

Ilustración 33 Carta de Factor Trabajabilidad y Grosor



Tomado de: ACI 325, 2014

La X en azul, muestra que la intersección de los dos coeficientes se encuentra de la zona 2 muy cerca a los limites o zona optima, por lo que se procederá a optimizar los agregados, suponiendo nuevos coeficientes que se encuentren dentro de la zona optima, en este caso FG= 60 y FT= a 38

La suma de áridos gruesos + intermedios + finos = 100%

Por lo tanto

$$Q+I+W=100\%$$

Para obtener el porcentaje de finos se usará la formula, donde se reemplazará el factor de trabajabilidad a 38% y se procederá a despejar

$$FT = W + \left(\frac{2.5(c-335)}{56}\right)$$

$$35\% = W + \left(\frac{2.5(376-335)}{56}\right)$$

$$W = 38\% - \left(\frac{2.5(376-335)}{56}\right) = 36.15\%$$

Entonces, el porcentaje de árido grueso Combinado será:

$$100 - W$$

$$100\% - 36.15\% = 63.85\%$$

Por lo tanto, se tendrá que

$$Agregado\ grueso = 63.85\%$$

$$Agregado\ fino = 36.15\%$$

Para encontrar el porcentaje de gravilla se debe cambiar el peso de los agregados de tal manera que el grafico de porcentajes retenidos acumulados, se aproxime a los límites de la curva de Fuller, en este caso

Tabla 24
Proporción en porcentaje de agregados por el método de Shilstone

Grava I	37%
Grava II	24%
Arena	39%

Tomado de: Elaboración Propia

De la granulometría inicial se obtiene el volumen de cada uno de los agregados y su porcentaje de composición resultando el siguiente cuadro resumen:

Tabla 25
Proporción en volumen y peso Shilstone

Proporción en volumen y peso Shilstone			
Volumen grava1 m3	0,248	Peso Grava Kg/m3	636
Volumen grava2 m3	0,159	Peso Grava Kg/m3	406
Volumen Arena m3	0,260	Peso Arena Kg/m3	672
sumatoria	0,667	Sumatoria	1714

Tomado de: Elaboración Propia

Dado que los agregados gruesos y finos en su estado natural contienen humedad que puede afectar la relación agua-cemento previamente establecida y tener un impacto significativo en la resistencia a la compresión después de 28 días, y considerando que estos materiales se mezclarán con humedad interna, es necesario reducir dicha humedad siguiendo los siguientes pasos:

Peso de agregado grueso grava en estado natural

$$(1.24\% \times 651) + 651 = 659.17Kg$$

Cantidad total de agua presente en el agregado grueso gravilla

$$659.17 - 651 = 8.07\ Kg$$

Peso de agregado grueso gravilla en estado natural

$$(1.36\% \times 427) + 427 = 432.46Kg$$

Cantidad total de agua presente en el agregado grueso gravilla

$$432.46 - 427 = 5.80Kg$$

Peso de agregado fino en estado natural

$$(3\% \times 691) + 691 = 712.10\ Kg$$

Cantidad total de agua presente en el agregado fino

$$712.10 - 691 = 20.74\ Kg$$

Finalmente, la cantidad de agua a reducir es de:

$$8.07 + 5.80 + 20.74 = 34.61\ Kg$$

$$175 - 34.48 = 140.39\ Kg$$

Con relación a lo anterior las cantidades de materiales solicitadas para el diseño de mezcla son las siguientes:

Tabla 26
Cantidades utilizadas en el diseño de mezcla para 1 m3 de concreto (agregados en estado húmedo)

Método de Shilstone	
cemento	376.34Kg
agua	140.38Kg
grava 1	659.17Kg
grava 2	432.46Kg
arena	712.10Kg

Tomado de: Elaboración Propia

10.9.4. PRINCIPIO DE OPTIMIZACIÓN POR CURVA DE LA TARANTULA

Como en los métodos anteriores, el método de la curva de la tarántula busca optimizar los áridos de una mezcla buscando conservar la propiedad de la resistencia, con una mayor trabajabilidad de la mezcla de concreto. El método nos pide elegir el contenido de cemento en función de la trabajabilidad, relación agua cemento y contenido de aire, pero debemos recordar que estos parámetros están previamente establecidos y no deben ser modificados, pues en general el método solicita que los áridos de una mezcla de concreto se encuentren dentro de los límites de la curva de referencia, el cual obtiene la forma de una tarántula, de ahí el nombre del método, para esto se deben cumplir parámetros como:

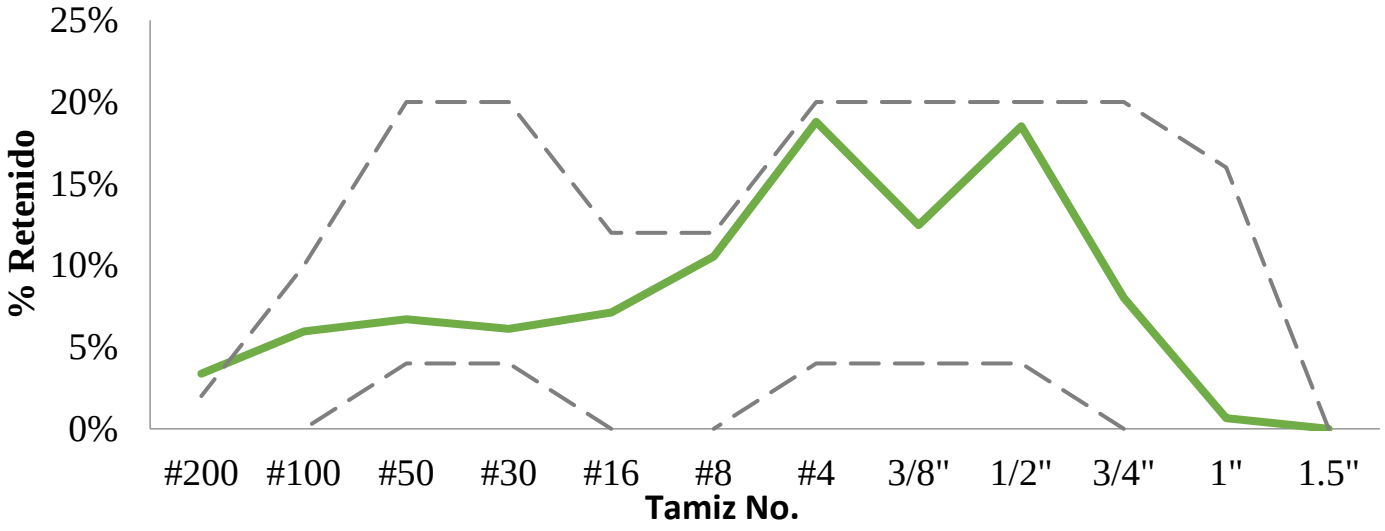
El porcentaje de arena gruesa debe ser mínimo del 15%, el porcentaje de arena fina debe estar entre 24 y 34 %, y es óptimo para encofrado deslizante, y puede estar entre 25- y 40 % como rango permisible para bombeo

Tabla 27
Granulometría combinada para el método C. de la tarántula

Tamiz	combinado % pasa	combinado % Retenido	Límite Máximo	Límite Mínimo	Cumple
1.5"	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	**no**
1"	99,35%	0,65%	16,00%	0,00%	**si**
3/4"	91,27%	8,08%	20,00%	0,00%	**si**
1/2"	72,69%	18,58%	20,00%	4,00%	**si**
3/8"	60,36%	12,33%	20,00%	4,00%	**si**
#4	41,81%	18,55%	20,00%	4,00%	**si**
#8	31,23%	10,58%	12,00%	0,00%	**si**
#16	24,05%	7,18%	12,00%	0,00%	**si**
#30	17,89%	6,17%	20,00%	4,00%	**si**
#50	11,14%	6,75%	20,00%	4,00%	**si**
#100	5,13%	6,01%	10,00%	0,00%	**si**
#200	1,74%	3,39%	2,00%	0,00%	**no**

Tomado de: Elaboración Propia

Ilustración 34 Gráfico de porcentaje retenido en cada una de las mallas para el método de la curva de la tarántula



Tomado de: Elaboración Propia

Usando los pesos de material obtenidos mediante el método de la curva de la tarántula, observamos que, la curva granulometría del material no se encuentra completamente Adentro de los límites de la gráfica y que se encuentra un pico en los agregados entre 3/8” y 1,

Se procede entonces a cambiar los pesos de los agregados mediante la utilización de la técnica de tanteo, hasta que la curva de los materiales se adapte a los limites propuestos, para esto y mediante una hoja de cálculo se regresó a la combinación que mayor se acerca y fue la siguiente:

Tabla 28
Cantidades de material obtenidas por tanteo para el método Curva de la tarántula

Material	peso (lbs/cy)	gravedad especifica	volumen (ft^3)
grava I	1364	2,56	8,53
grava II	1059	2,55	6,66
grava III	0		0,00
arena I	1553	2,59	9,62
cemento	0	0	0,00
agua	830	3,1	4,29
aire	0	2,5	0,00
Total	2273,0	lbs/cy	16,08

Tomado de: Elaboración Propia

Tabla 29
Proporción en porcentaje de agregados por el método de Curva de la tarántula

Grava I	34%
Grava II	27%
Arena	39%

Tomado de: Elaboración Propia

Por lo tanto, se tiene resumidamente para el método:

Tabla 30
Proporciones en volumen y peso C. de la Tarántula

Proporciones en volumen y peso C. de la Tarántula			
volumen grava1 m3	0,237	Peso Grava Kg/m3	607
volumen grava2 m3	0,185	Peso Grava Kg/m3	471
volumen Arena m3	0,267	Peso Arena Kg/m3	691
sumatoria	0,689	sumatoria	1769

Tomado de: Elaboración Propia

Dado que los agregados gruesos y finos en su estado natural contienen humedad que puede afectar la relación agua-cemento previamente establecida y tener un impacto significativo en la resistencia a la compresión después de 28 días, y considerando que

estos materiales se mezclarán con humedad interna, es necesario reducir dicha humedad siguiendo los siguientes pasos:

Peso de agregado grueso grava en estado natural

$$(1.24\% \times 607) + 607 = 614.36Kg$$

Cantidad total de agua presente en el agregado grueso gravilla

$$614.36 - 607 = 7.52\ Kg$$

Peso de agregado grueso gravilla en estado natural

$$(1.36\% \times 471) + 471 = 477.55Kg$$

Cantidad total de agua presente en el agregado grueso gravilla

$$477.55 - 471 = 6.41Kg$$

Peso de agregado fino en estado natural

$$(3\% \times 691) + 691 = 711.64\ Kg$$

Cantidad total de agua presente en el agregado fino

$$711.64 - 691 = 20.73\ Kg$$

Finalmente, la cantidad de agua a reducir es de:

$$7.52 + 6.41 + 20.73 = 34.66\ Kg$$

$$175 - 34.66 = 140.34\ Kg$$

Con relación a lo anterior las cantidades de materiales solicitadas para el diseño de mezcla son las siguientes:

Tabla 31
Cantidades utilizadas en el diseño de mezcla para 1 m3 de concreto (agregados en estado húmedo)

Método de curva de la tarántula	
cemento	376.34Kg
agua	140.34Kg
grava 1	614.36Kg
grava 2	477.55Kg
arena	711.64Kg

Tomado de: Elaboración Propia

10.10. RESUMEN DE CANTIDADES REQUERIDAS EN EL DISEÑO DE MEZCLA CONCRETO.

Una vez calculadas los cálculos las cantidades de materiales requeridos se presenta el siguiente resumen de dosificación por cada material en peso y porcentaje.

Tabla 32
cantidad de materiales para la elaboración de las 30 camisas por cada método - Peso en (Kg)

cantidad de materiales por cada método - Peso en (Kg)						
método\material	**cemento**	**agua**	**grava 1**	**grava 2**	**arena**	**total**
Fuller	19.508	7.295	32.916	24.823	35.719	120.262
Mínimos cuadrados	19.508	7.283	34.421	22.541	36.526	120.280
Shilstone	19.508	7.277	34.169	22.417	36.889	120.260
Curva de la tarántula	19.508	7.277	31.846	24.754	34.914	118.300
pesos subtotales x material	78.033	29.132	133.352	94.536	36.889	479.102

Tomado de: Elaboración Propia

Tabla 33
cantidad de materiales para la elaboración de las 30 camisas por cada método–volumen en Porcentaje(%)

composición de materiales por cada método - Porcentaje (%)					
método\material	**cemento**	**agua**	**grava 1**	**grava 2**	**arena**
Fuller	16,22%	6,07%	27,37%	20,64%	29,70%
Mínimos cuadrados	16,22%	6,06%	28,62%	18,74%	30,37%
Shilstone	16,22%	6,54%	28,41%	18,64%	30,19%
Curva de la tarántula	16,41%	6,62%	26,79%	20,82%	29,37%
porcentajes promedio x material	16,27%	6,32%	27,80%	19,71%	29,91%

Tomado de: Elaboración Propia

A grandes rasgos es apreciable la familiaridad en cuanto a la similitud entre las cantidades de material requerida para los métodos de optimización que dependen del porcentaje pasa (Fuller - Mínimos Cuadrados) y los que involucran el porcentaje retenido (Shilstone – Curva de la Tarántula)

11. ELABORACION Y CURADO DE ESPECIMENES CILÍNDRICOS DE CONCRETO NORMAL

FECHA DE REALIZACIÓN

El proceso de elaboración de especímenes cilíndricos de concreto normal fue realizado el día martes 4 de diciembre del 2022, en las instalaciones de la Universidad distrital Francisco José de Caldas Facultad tecnológica localizadas en la Av. Villavicencio, Cl. 68d Bis A Sur # 49F-70 Bogotá Colombia.

11.1. MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS

Para la fundición de cilindros de concreto normal de los cuatro diseños experimentales se requirió la utilización de los siguientes materiales y equipos:

Ilustración 35 Instrumentos requeridos para la fundición de probetas cilíndricas de concreto



Tomado de: Elaboración Propia

Ilustración 36 Herramienta menor necesaria para la fundición de muestras de concreto.



Tomado de: Elaboración Propia

- 30 moldes cilíndricos plásticos de 100 mm de diámetro, con altura de 200 mm de acuerdo a las especificaciones de la NTC – 1377.
- 1 varilla compactadora corta de 10 mm de diámetro y 300 mm de longitud.
- Bascula para dosificación de material de acuerdo al diseño de mezcla.
- Mezcladora de concreto (Trompo) con capacidad de 0,25 m3.
- Martillo de goma.
- Palustre.
- Llana metálica.
- 1 pala.
- Desmoldante para formaletas

11.2. PROCEDIMIENTO GENERAL

Para la elaboración de probetas cilíndricas de concreto que luego serán sometidas al ensayo de compresión se aplicó el siguiente procedimiento iniciando con el método de Fu:

Paso 1. Separar y clasificar la cantidad de agregado necesario para el diseño de mezcla según su tamaño con el propósito de cumplir los limites granulométricos descritos en la NTC – 4045 tanto para agregado grueso como para agregado fino.

Ilustración 37 Selección de material pétreo de tamaño 1”



Ilustración 38 Selección de material pétreo de tamaño 1/2”



Ilustración 39 Selección de material fino tamiz pasa 200



Tomado de: Elaboración Propia

Paso 2. Luego de clasificar el material, fue depositado y almacenado en un lugar específico por 24 horas para alcanzar el estado de absorción con el quese realizó el diseño de mezcla y las correcciones de agua de mezclado.

Ilustración 40 Pesaje del material para muestras



Ilustración 41 Dosificación de grava para muestras



Ilustración 42 Dosificación de arena para muestras



Tomado de: Elaboración Propia

Paso 3 Una vez seco el material se procedió a mezclar el agregado tanto fino como grueso teniendo en cuenta la granulometría y su cantidad necesaria en kg para fundir las probetas. Al conformar el material se humedecen las superficies de los materialescon agua ya sean las paredes del trompo, la superficie interna de cada una de las probetas y la herramienta menor.

Ilustración 43 Mezcla manual plásticas



Ilustración 44 elección de material pétreo de tamaño ½"



Ilustración 45 Lubricación de camisas



Tomado de: Elaboración Propia

Paso 4. el proceso de mezclado se comienza vertiendo los componentesde la mezcla al interior del trompo de la siguiente manera: se incluyó la cantidad deagregado grueso en kg perfectamente gradado, junto con un 30% de la cantidad delagua de mezclado, luego, la mezcladora se colocó en funcionamiento 1 minuto, luego se apagó para incluir el agregado fino, el cemento, mezclando por 1 minuto y finalmente se adicionó el 70% de agua faltante, para así conformar el material dentrodel equipo por otros 50 segundos.

Ilustración 46 Aplicación de agua a la mezcla



Ilustración 47 Premezclado manual antes del mecánico



Ilustración 48 Mezcla final mediante uso del trompo



Tomado de: Elaboración Propia

Paso 5 vertimiento de la mezcla sobre una superficie previamente humedecida para luego realizar la prueba de asentamiento y posterior a ello la conformación de las probetas cilíndricas. Cada una de las probetas se fundió de la siguiente manera según lo establecido en la Norma Técnica Colombiana NTC - 1377, como las probetas son de 100 mm de diámetro por 200 mm de altura, se vertió una cantidad de concreto que las llenara hasta aproximadamente la mitad de su altura para luego compactarla con 25 golpes,de manera similar se llenó con material el resto de la probeta compactándola usando la varilla 25 veces garantizando que esta penetrara ligeramente la capa inferior no más de 25 mm. Por último, se enrasa la probeta utilizando la llana metálica, capa de material plástico no absorbente para evitar la evaporación del agua, los cilindros se dejan reposar un periodo de 24 horas para que alcancen una consistencia endurecida.

Ilustración 49 Aplicación de 25 golpes con la varilla



Ilustración 50 Enrase de las muestras en estado fresco



Ilustración 51 Aplicación de golpes con martillo de goma



Tomado de: Elaboración Propia

Ilustración 52 Almacenamiento muestral antes de desencofrar



Ilustración 53 Almacenamiento muestral antes de desencofrar



Ilustración 54 Almacenamiento muestral antes de desencofrar



Tomado de: Elaboración Propia

Paso 6. Al día siguiente se realiza el proceso de desencofrando de las muestras mediante la presión de aire comprimido a través del orificio de las cuales fueron inmediatamente sumergidas en un ambiente húmedo garantizando 100% esta condición sobre toda el área superficial en todo momento hasta que se cumplan los tiempos de curado en los que se deba hacer el ensayo de la resistencia a la compresión estos procedimientos del 1 al 6 se repitieron durante los 3 días siguientes para cada uno de los 3 métodos restantes (MINIMOS CUADRADOS, SHILSTONE y CURVA DE LA TARANTULA) consecutivamente.

Ilustración 55 desencofrada de muestras 1 día después de fundidas



Ilustración 56 Uso de pistola de compresión para desencofrada de muestras

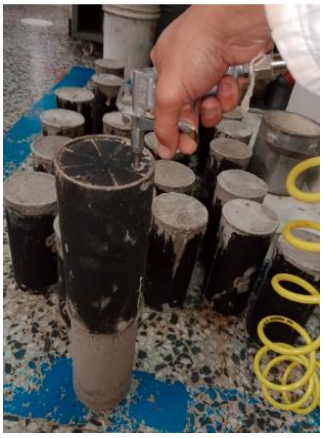


Ilustración 57 Introducción de aire por el agujero de paso de aire



Ilustración 58 Curado de muestras una vez desencofradas



Ilustración 59 Sumergimiento de muestras con cal añadida



Ilustración 60 Almacenamiento de muestras en ambiente sumergido



Tomado de: Elaboración Propia

11.3. ENSAYO DE ASENTAMIENTO DEL CONCRETO (CONO DE ABRAMS)

El ensayo descrito a continuación fue realizado el día martes 4 de diciembre (mismo día de elaboración y con antelación al ensayo de elaboración de especímenes cilíndricos) del 2022, en las instalaciones de la Universidad distrital Francisco José de Caldas Facultad tecnológica localizadas en la Av. Villavicencio, Cl. 68d Bis A Sur # 49F-70 Bogotá Colombia.

OBJETIVOS

La estimación del asentamiento del concreto permite identificar de manera indirectael grado de manejabilidad del concreto liviano estructural fabricado a partir de la roca pómez en estado plástico. Como bien se sabe la manejabilidad se define comola propiedad del concreto en estado fresco para colocarse, acomodarse y ser consolidado dentro de un molde sin generar segregación.

MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS

Para realizar el ensayo de asentamiento a la mezcla de concreto liviano simple, como al que contiene el aditivo reductor de absorción se requirieron los siguientes materiales y equipos:

- Molde tronco cónico de 305 mm de alto, el cual cumple las especificacionesde la Norma Técnica Colombiana NTC 396; este, cuenta con agarraderas de pie.
- Varilla compactadora de acero de 600 mm de longitud y 16 mm de diámetro.
- Palustre.
- Cuchara.

PROCEDIMIENTO GENERAL DEL ENSAYO

Se prepara el molde troncocónico humedeciéndolo internamente, además debe ser colocado sobre una superficie plana y lisa también en condición húmeda para evitar que absorba el agua de mezcla. Luego se vierten tres capas de material en el molde sabiendo que cada una de ellas comprende 1/3 de altura del molde troncocónico. Cada una de las capas se compacta 25 veces utilizando la varilla, introduciéndola ligeramente en la capa de concreto inmediatamente anterior. Al finalizar el proceso de compactación se nivela la superficie del molde eliminando el material de exceso, Después, se levanta el molde de manera vertical sin generar movimiento o aplicar vibración, luego se coloca la varilla encima del cono de forma horizontal y se toma la medida en centímetros desde la varilla a la parte más alta de cumulo de mezcla que resultante (el resultado obtenido será analizado más adelante).

Ilustración 61 Cono de Abrams y varilla metálica



Tomado de: Elaboración Propia

Ilustración 62 25 golpes



Tomado de: Elaboración Propia

Ilustración 63 retiro del molde troncocónico



Tomado de: Elaboración Propia

12. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS DE CONCRETO

FECHA DE REALIZACIÓN

El ensayo descrito a continuación fue realizado los días 10, 17 y 31 de diciembre de 2022 para la mezcla de concreto liviano normalizado en las instalaciones de la empresa CEMEX Colombia, localizadas en la Avenida Boyacá con calle 71 Sur; mientras que para la mezcla de concreto liviano que incluía el aditivo reductor de absorción no fue posible realizar dicho ensayo debido a la inconsistencia de la mezcla además de la ausencia de solidez, que será descrita a continuación.

OBJETIVOS

El ensayo realizado para la determinación de resistencia a la compresión de los cilindros de concreto, fabricados a partir de la NTC - 1377 se puede considerar comoel más importante del presente proyecto. Este medirá dicha variable de respuesta de los dos arreglos experimentales (un diseño de mezcla de concreto liviano que incluye el aditivo reductor de absorción, y otro que no, tomando al último como referencia de variación de resistencia). El ensayo de resistencia a la compresión medirá el desarrollo de esta característica a los 7, 14 y 28 días, a un total de 104 probetas cilíndricas de 102 mm de a diámetro por 204 mm de altura. Además, se podrá medir el desempeño de la roca pómez al utilizarla como material de agregadofino y agregado grueso en la fabricación de concreto liviano estructural de 21MPa, lo que también permitirá sacar conclusiones sobre la metodología utilizada en el diseño de mezcla "*método volumétrico"* según el A.C.I. 211.2.

MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS

Los materiales y equipos utilizados en el ensayo de resistencia a la compresión fueron los siguientes:

- Máquina de ensayo de resistencia a la compresión, la cual cumple los requerimientos de diseño y exactitud descritos en la Norma Técnica Colombiana NTC – (673) con indicador de carga digital.
- Calibrador o pie de rey.
- Bloques de apoyo con cara endurecida, uno de ellos cuanta con una rótula para apoyar la superficie superior de la probeta; el otro, consta de una superficie lisa en donde reposa el cilindro durante el ensayo.
- Se dispondrá de 30 cilindros en total para cada uno de los periodos especificados; 15 correspondientes a cada optimización del diseñó de mezcla de concreto

12.1. PROCEDIMIENTO GENERAL DEL ENSAYO

Para realizar el ensayo de resistencia a la compresión en los dos arreglos experimentales fue necesario seguir el siguiente procedimiento:

Inicialmente se cuenta con la normatividad colombiana NTC – 673, que especifica los rangos de tolerancia para la realización del ensayo teniendo en cuenta el periodo de desarrollo de resistencia, además de clarificar de que este ensayo se realiza para especímenes que se encuentran en condición húmeda; a continuación, se muestran los tiempos máximos de tolerancia en la siguiente tabla:

Tabla 34
Tolerancias de tiempo permisibles ensayo de resistencia a compresión.

Edad de ensayo	Tolerancia permisible
24h	± 0.5 h o 2.1 %
3d	2 h o 2.8 %
7d	6 h o 3.6 %
14d	6 h o 3.6 %
28d	20 h o 3.0 %

Tomado de NTC – 673. Ensayo de resistencia a la compresión de cilindros normales de concreto.

Teniendo en cuenta los rangos de tolerancia para los periodos de tiempo especificados, se toma la medida del diámetro y altura de dos muestras por cada lote perteneciente a cada uno de los arreglos experimentales, luego se coloca una probeta entre los dos bloques, además su eje debe alinearse perfectamente con eleje del elemento que ejercerá presión sobre la muestra. Después, se verifica que lamáquina se encuentre en ceros (Sin tener lectura alguna de fuerza), para ello se hace descender el pisón hasta que se encuentre lo más cerca posible de la base superior, al hacer girar la base esta debe deslizarse, indicando así que el pisón, noejerce ninguna fuerza sobre la probeta. Posterior a ello se aplica una cargaconstante sobre el cilindro hasta que finalmente alcanza la falla. Allí se reporta la carga máxima a la que falla la probeta.

12.2. RESULTADOS OBTENIDOS

Luego de realizar el ensayo de resistencia a la compresión se obtuvieron los siguientes resultados de fuerza en KN, además se puede observar el tipo de falla desarrollada en cada una de las probetas:

Para calcular el esfuerzo máximo de falla se contó con la siguiente información:

La relación L/D utilizada en el ensayo está dada por la siguiente ecuación:

Ecuación 23.

$$\frac{L}{D} = \frac{200}{100} = 2$$

como L/D = 2 mm no se realiza corrección para el cálculo de resistencia a la compresión:

Para calcular la resistencia desarrollada de cada una de las muestras se utiliza la siguiente ecuación:

Ecuación 24.

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

Dónde:

σ = Esfuerzo de falla de cada una de las probetas KPa.

P = Fuerza máxima registrada por la máquina KN.

A = Área de la probeta m2.

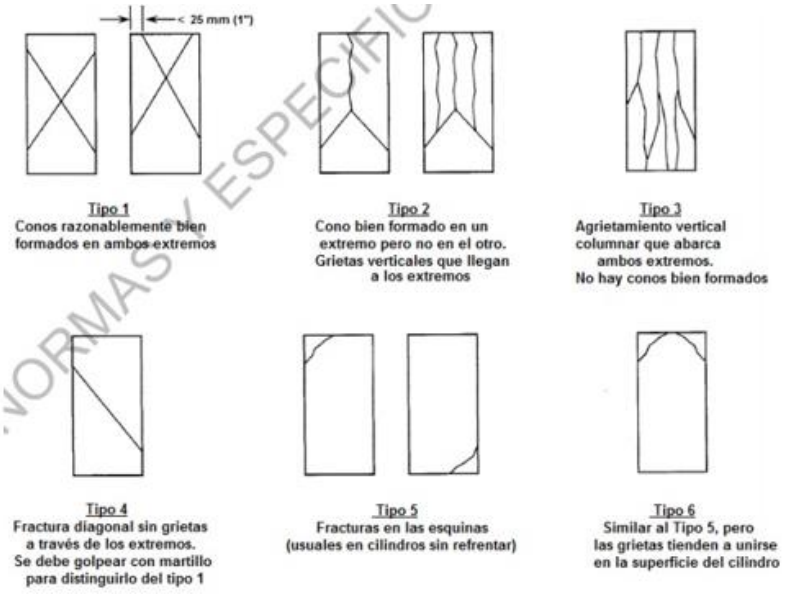
El área para cada una de las probetas fue hallada a través de la siguiente expresión

Ecuación 25.

$$A = \pi r^2$$

Para finalizar se reporta el tipo de falla de cada una de las muestras, teniendo encuenta el siguiente gráfico:

Ilustración 64 Esquema de patrones típicos de falla.



Tomado de INV E – 410 - 13. Resistencia a la Compresión de Cilindros de Concreto.

12.3. ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN CONCRETO NORMAL (7 DÍAS)

El día 10 de diciembre del 2019 se fallaron los primeros 15 cilindros correspondientes a la mezcla de concreto; cada uno de los cilindros fue sacado de los recipientes de curado luego de estar allí por 7 días, estos fueron secados alaire para para luego fallarlos en una máquina la cual cumple las características descritas en la norma técnica NTC - 673.

Ilustración 65 Cilindro de concreto - distribución de carga uniforme sobre el área circular



Ilustración 66 Máquina para fallar cilindros aplica una carga constante a velocidad uniforme.



Tomado de: Elaboración Propia

A cada uno de los cilindros se le tomó las siguientes lecturas en el laboratorio comolo son: diámetro, altura, peso, carga ultima a la que falló la probeta, y finalmente seobservó el tipo de falla.

Ilustración 67 Cilindros de concreto dispuestos para ensayo de resistencia a compresión



Tomado de: Elaboración Propia

Ilustración 68 Cilindros de concreto dispuestos para ensayo de resistencia a compresión



Tomado de: Elaboración Propia

12.4. RESULTADOS OBTENIDOS A LOS 7 DIAS

Los resultados obtenidos al fallar las 15 probetas cilíndrica a Los 7 días son los siguientes:

Tabla 35

Desarrollo de resistencia a los 7 días para 15 probetas método de Fuller

desarrollo de resistencia a los 7 días para 15 probetas											
					Fuller						
día de falla	**Probeta N°**	**θ (cm)**	**Altura (cm)**	**Área (cm²)**	**Volumen (cm³)**	**peso (g)**	**densidad (Kg/m³)**	**Carga (KN)**	**σ en MPa**	**% Res**	**Tipo de falla**
7	1	10	20.1	788.54	1578.65	3644	2.31	130.3	16.59	115.52	3
7	2	10	20.2	791.68	1586.51	3642	2.30	117.5	14.96	104.17	2
7	3	10	19.9	782.26	1562.95	3652	2.34	120.5	15.34	106.83	2
7	4	10	19.9	782.26	1562.95	3658	2.34	127.4	16.22	112.95	5
7	5	10	20	785.40	1570.80	3652	2.32	109.4	13.93	96.99	3
7	6	10	20	785.40	1570.80	3643	2.32	126.6	16.12	112.24	2
7	7	10	20.1	788.54	1578.65	3653	2.31	132.8	16.91	117.74	2
7	8	10	20.3	794.82	1594.36	3648	2.29	126.9	16.16	112.51	1
7	9	10	20.2	791.68	1586.51	3637	2.29	114.8	14.62	101.78	4
7	10	10	20.1	788.54	1578.65	3652	2.31	106.8	13.60	94.69	2
7	11	10	20.2	791.68	1586.51	3649	2.30	104.3	13.28	92.47	1
7	12	10	20	785.40	1570.80	3657	2.33	134.5	17.13	119.25	5
7	13	10	20.1	788.54	1578.65	3650	2.31	127.9	16.28	113.39	5
7	14	10	20.1	788.54	1578.65	3652	2.31	121.5	15.47	107.72	6
7	15	10	20.2	791.68	1586.51	3643	2.30	116.3	14.81	103.11	5

Tomado de: Elaboración Propia

Tabla 36

Desarrollo de resistencia a los 7 días para 15 probetas método de Shilstone.

desarrollo de resistencia a los 7 días para 15 probetas											
					Shilstone						
día de falla	**Probeta N°**	**θ (cm)**	**Altura (cm)**	**Área (cm²)**	**Volumen (cm³)**	**peso (g)**	**densidad (Kg/m³)**	**Carga (KN)**	**σ en MPa**	**% Res**	**Tipo de falla**
7	1	10	20	785.40	1570.80	3634	2.31	98.4	12.53	87.24	1
7	2	10	20	785.40	1570.80	3632	2.31	104.5	13.31	92.65	2
7	3	10	19.9	782.26	1562.95	3642	2.33	107.2	13.65	95.04	2
7	4	10	19.9	782.26	1562.95	3650	2.34	100.3	12.77	88.92	5
7	5	10	20	785.40	1570.80	3638	2.32	86.9	11.06	77.04	6
7	6	10	20.2	791.68	1586.51	3647	2.30	92	11.71	81.57	5
7	7	10	20.1	788.54	1578.65	3641	2.31	77.3	9.84	68.53	5
7	8	10	20	785.40	1570.80	3649	2.32	86.2	10.98	76.42	2
7	9	10	20.1	788.54	1578.65	3647	2.31	91.1	11.60	80.77	2
7	10	10	19.9	782.26	1562.95	3653	2.34	99.2	12.63	87.95	3
7	11	10	20	785.40	1570.80	3642	2.32	90	11.46	79.79	5
7	12	10	20.1	788.54	1578.65	3647	2.31	105	13.37	93.09	4
7	13	10	20.2	791.68	1586.51	3651	2.30	86.4	11.00	76.60	3
7	14	10	19.9	782.26	1562.95	3655	2.34	86.3	10.99	76.51	2
7	15	10	20	785.40	1570.80	3639	2.32	95.5	12.16	84.67	2

Tomado de: Elaboración Propia

Tabla 37

Desarrollo de resistencia a los 7 días para 15 probetas método de mínimos cuadrados.

desarrollo de resistencia a los 7 días para 15 probetas											
						Mínimos cuadrados					
día de falla	Probeta N°	θ (cm)	Altura (cm)	Área (cm²)	Volumen (cm³)	peso (g)	densidad (Kg/m³)	Carga (KN)	σ en MPa	% Res	Tipo de falla
7	1	10	20	785.40	1570.80	3634	2.31	105	13.37	93.09	2
7	2	10	20.1	788.54	1578.65	3632	2.30	104.2	13.27	92.38	2
7	3	10	19.8	779.12	1555.09	3642	2.34	110	14.01	97.52	3
7	4	10	20	785.40	1570.80	3631	2.31	112.1	14.27	99.39	3
7	5	10	20.2	791.68	1586.51	3628	2.29	105.2	13.39	93.27	3
7	6	10	20.1	788.54	1578.65	3647	2.31	117.1	14.91	103.82	3
7	7	10	19.9	782.26	1562.95	3641	2.33	116.7	14.86	103.46	5
7	8	10	20.2	791.68	1586.51	3657	2.31	113	14.39	100.18	2
7	9	10	20.1	788.54	1578.65	3655	2.32	110	14.01	97.52	5
7	10	10	20	785.40	1570.80	3638	2.32	119.5	15.22	105.95	3
7	11	10	20	785.40	1570.80	3670	2.34	111.8	14.23	99.12	3
7	12	10	20.2	791.68	1586.51	3661	2.31	113.7	14.48	100.81	1
7	13	10	20.1	788.54	1578.65	3656	2.32	119	15.15	105.50	5
7	14	10	19.9	782.26	1562.95	3646	2.33	112.3	14.30	99.56	3
7	15	10	20.1	788.54	1578.65	3637	2.30	113.7	14.48	100.81	3

Tomado de: Elaboración Propia

Tabla 38

Desarrollo de resistencia a los 7 días para 15 probetas método de la curva de la tarántula

desarrollo de resistencia a los 7 días para 15 probetas											
						Tarántula					
día de falla	Probeta N°	θ (cm)	Altura (cm)	Área (cm²)	Volumen (cm³)	peso (g)	densidad (Kg/m³)	Carga (KN)	σ en MPa	% Res	Tipo de falla
7	1	10	19.9	782.26	1562.95	3624	2.32	98.2	12.50	87.06	3
7	2	10	20	785.40	1570.80	3627	2.31	97.7	12.44	86.62	3
7	3	10	20.1	788.54	1578.65	3621	2.29	99.6	12.68	88.30	2
7	4	10	20.1	788.54	1578.65	3631	2.30	100	12.73	88.66	3
7	5	10	20	785.40	1570.80	3640	2.32	102.3	13.03	90.70	1
7	6	10	20.2	791.68	1586.51	3626	2.29	103.5	13.18	91.76	3
7	7	10	20.1	788.54	1578.65	3619	2.29	99.2	12.63	87.95	2
7	8	10	20	785.40	1570.80	3618	2.30	105.4	13.42	93.45	1
7	9	10	20	785.40	1570.80	3627	2.31	105.9	13.48	93.89	3
7	10	10	20.2	791.68	1586.51	3622	2.28	102.8	13.09	91.14	2
7	11	10	20.1	788.54	1578.65	3621	2.29	110.1	14.02	97.61	2
7	12	10	19.9	782.26	1562.95	3616	2.31	106.2	13.52	94.16	3
7	13	10	20	785.40	1570.80	3625	2.31	97.4	12.40	86.35	1
7	14	10	20.1	788.54	1578.65	3615	2.29	98.3	12.52	87.15	1
7	15	10	20	785.40	1570.80	3623	2.31	101.1	12.87	89.63	5

Tomado de: Elaboración Propia

12.5. RESULTADOS OBTENIDOS A LOS 28 DIAS

Los resultados obtenidos al fallar las 15 probetas cilíndricas a Los 28 días son los siguientes:

Tabla 39 *Desarrollo de resistencia a los 28 días para 15 probetas método de Fuller*

Desarrollo de resistencia a los 28 días para 15 probetas

						Fuller					
día de falla	**Probeta N°**	**θ (cm)**	**Altura (cm)**	**Área (cm²)**	**Volumen (cm³)**	**peso (g)**	**densidad (Kg/m³)**	**Carga (KN)**	**σ en MPa**	**% Res**	**Tipo de falla**
28	1	10	20.05	786.97	1574.73	3634	2.31	184.23	23.46	111.70	3
28	2	10	20	785.40	1570.80	3632	2.31	165.53	21.08	100.36	2
28	3	10	20	785.40	1570.80	3642	2.32	190.61	24.27	115.57	3
28	4	10	19.9	782.26	1562.95	3651	2.34	186.64	23.76	113.16	5
28	5	10	20	785.40	1570.80	3659	2.33	189.46	24.12	114.87	3
28	6	10	20.1	788.54	1578.65	3633	2.30	187.89	23.92	113.92	3
28	7	10	20.2	791.68	1586.51	3643	2.30	185.91	23.67	112.72	6
28	8	10	20	785.40	1570.80	3668	2.34	188.20	23.96	114.11	6
28	9	10	20	785.40	1570.80	3651	2.32	189.46	24.12	114.87	5
28	10	10	20.1	788.54	1578.65	3659	2.32	177.86	22.65	107.84	3
28	11	10	20	785.40	1570.80	3639	2.32	177.44	22.59	107.58	6
28	12	10	20	785.40	1570.80	3634	2.31	186.95	23.80	113.35	2
28	13	10	20.2	791.68	1586.51	3629	2.29	193.64	24.65	117.40	6
28	14	10	19.9	782.26	1562.95	3632	2.32	190.40	24.24	115.44	5
28	15	10	20.1	788.54	1578.65	3673	2.33	178.59	22.74	108.28	2

Tomado de: Elaboración Propia

Tabla 40 *Desarrollo de resistencia a los 28 días para 15 probetas método de Shilstone.*

Desarrollo de resistencia a los 28 días para 15 probetas

						Shilstone					
día de falla	**Probeta N°**	**θ (cm)**	**Altura (cm)**	**Área (cm²)**	**Volumen (cm³)**	**peso (g)**	**densidad (Kg/m³)**	**Carga (KN)**	**σ en MPa**	**% Res**	**Tipo de falla**
28	1	10	20	785.40	1570.80	3654	2.33	148.122	18.86	89.81	1
28	2	10	19.9	782.26	1562.95	3631	2.32	128.752	16.39	78.06	3
28	3	10	19.9	782.26	1562.95	3635	2.33	124.592	15.86	75.54	3
28	4	10	20	785.40	1570.80	3644	2.32	135.408	17.24	82.10	3
28	5	10	20	785.40	1570.80	3652	2.32	137.696	17.53	83.49	6
28	6	10	20	785.40	1570.80	3653	2.33	146.404	18.64	88.77	3
28	7	10	20.2	791.68	1586.51	3663	2.31	166.573	21.21	100.99	3
28	8	10	20.1	788.54	1578.65	3661	2.32	154.973	19.73	93.96	3
28	9	10	20.2	791.68	1586.51	3644	2.30	155.914	19.85	94.53	2
28	10	10	20	785.40	1570.80	3652	2.32	131.565	16.75	79.77	6
28	11	10	20	785.40	1570.80	3632	2.31	150.062	19.11	90.98	3
28	12	10	20	785.40	1570.80	3627	2.31	137.731	17.54	83.51	3
28	13	10	20.1	788.54	1578.65	3622	2.29	134.178	17.08	81.35	2
28	14	10	20	785.40	1570.80	3631	2.31	139.403	17.75	84.52	2
28	15	10	20	785.40	1570.80	3666	2.33	138.149	17.59	83.76	2

Tomado de: Elaboración Propia

Tabla 41

Desarrollo de resistencia a los 28 días para 15 probetas método de mínimos cuadrados.

desarrollo de resistencia a los 28 días para 15 probetas											
						Mínimos cuadrados					
día de falla	**Probeta N°**	**θ (cm)**	**Altura (cm)**	**Área (cm²)**	**Volumen (cm³)**	**peso (g)**	**densidad (Kg/m³)**	**Carga (KN)**	**σ en MPa**	**% Res**	**Tipo de falla**
28	1	10	20	785.40	1570.80	3634	2.31	169.8	21.62	102.95	6
28	2	10	20	785.40	1570.80	3632	2.31	170.1	21.66	103.13	3
28	3	10	20	785.40	1570.80	3639	2.32	165.4	21.06	100.28	2
28	4	10	19.9	782.26	1562.95	3648	2.33	166.2	21.16	100.77	3
28	5	10	20.1	788.54	1578.65	3656	2.32	158.2	20.14	95.92	3
28	6	10	20.1	788.54	1578.65	3633	2.30	163.7	20.84	99.25	3
28	7	10	20	785.40	1570.80	3643	2.32	171.3	21.81	103.86	6
28	8	10	20	785.40	1570.80	3665	2.33	168.4	21.44	102.10	3
28	9	10	19.9	782.26	1562.95	3648	2.33	173.6	22.10	105.25	3
28	10	10	20	785.40	1570.80	3656	2.33	163.1	20.77	98.89	6
28	11	10	20	785.40	1570.80	3636	2.31	172.5	21.96	104.59	2
28	12	10	20.1	788.54	1578.65	3631	2.30	173.1	22.04	104.95	2
28	13	10	20.1	788.54	1578.65	3626	2.30	170.9	21.76	103.62	3
28	14	10	20	785.40	1570.80	3632	2.31	165.2	21.03	100.16	3
28	15	10	20	785.40	1570.80	3670	2.34	166.8	21.24	101.13	3

Tomado de: Elaboración Propia

Tabla 42

Desarrollo de resistencia a los 28 días para 15 probetas método de la curva de la tarántula

desarrollo de resistencia a los 28 días para 15 probetas											
						Tarántula					
día de falla	**Probeta N°**	**θ (cm)**	**Altura (cm)**	**Área (cm²)**	**Volumen (cm³)**	**peso (g)**	**densidad (Kg/m³)**	**Carga (KN)**	**σ en MPa**	**% Res**	**Tipo de falla**
28	1	10	19.9	782.26	1562.95	3638	2.33	160.1	20.38	97.07	3
28	2	10	20	785.40	1570.80	3633	2.31	135.3	17.23	82.03	3
28	3	10	20	785.40	1570.80	3635	2.31	168.3	21.43	102.04	2
28	4	10	20.2	791.68	1586.51	3644	2.30	172.6	21.98	104.65	6
28	5	10	20.1	788.54	1578.65	3652	2.31	180.4	22.97	109.38	2
28	6	10	20.1	788.54	1578.65	3637	2.30	184.2	23.45	111.68	1
28	7	10	20	785.40	1570.80	3647	2.32	173.3	22.07	105.07	3
28	8	10	20	785.40	1570.80	3661	2.33	183.4	23.35	111.20	6
28	9	10	19.9	782.26	1562.95	3644	2.33	169.4	21.57	102.71	6
28	10	10	20	785.40	1570.80	3652	2.32	171.9	21.89	104.22	2
28	11	10	20.3	794.82	1594.36	3632	2.28	165.8	21.11	100.53	3
28	12	10	20.2	791.68	1586.51	3627	2.29	166.9	21.25	101.19	3
28	13	10	20	785.40	1570.80	3622	2.31	182.4	23.22	110.59	3
28	14	10	20	785.40	1570.80	3633	2.31	183.6	23.38	111.32	2
28	15	10	20.1	788.54	1578.65	3666	2.32	164.9	21.00	99.98	6

Tomado de: Elaboración Propia

13. INTERPRETACION DE RESULTADOS

Para tener un panorama más claro con respecto a los conjuntos de datos recolectados es necesario realizar análisis más específicos para conocer a profundidad el comportamiento o las tendencias de los datos o si son cualitativa y cuantitativamente aceptables.

13.1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Según la NTC 2275 (1997) Los procedimientos estadísticos no sólo proporcionan medios valiosos para la evaluación de los resultados de los ensayos de la resistencia, sino que la información derivada de dichos procedimientos sirve también para depurar los criterios y las especificaciones del diseño. (NTC 2275, 1997, pág. 2).

Usando lo resultados obtenidos de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos y asentamiento del concreto según NTC 673 y NTC 396, se procede a determinar el cumplimiento de las especificaciones de resistencia de cada una de los diseños de mezcla usados y su variabilidad, realizando un análisis estadístico de los datos.

Los resultados de dicho análisis para los periodos de tiempo de desarrollo a la resistencia de 7 y 28 días y de cada uno de los diseños de mezcla (Fuller, mínimos cuadrados, Shilstone y curva de la tarántula), se muestran a continuación.

13.1.1. DESARROLLO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Según la NTC 2275, el patrón que debe asumir los resultados de resistencia a la compresión debe seguir la curva de distribución normal, la curva será elevada y angosta si los valores se encuentran cerca de la media, y será pequeña y prolongada si los valores se apartan. (NTC 2275, 1997)
Debe recordarse que de la relación agua- material cementante depende de manera directa la variabilidad del desarrollo a la compresión del concreto, para los concretos normales obtenidos con base en los diseños de mezcla (Fuller, mínimos cuadrados, Shilstone y curva de la tarántula) se verificara si el comportamiento es similar a lo que dicta la norma, siguiendo el procedimiento propuesto en la NTC 2275.

13.1.2. CALCULO DE PARAMETROS ESTADISTICOS TIPICOS

13.1.2.1. Promedio

Valor medio de resistencia a la compresión de los ensayos realizados, se expresa con la formula:

Ecuación 25.

$$\bar{X} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$$

13.1.2.2. Varianza

Medida de variabilidad de las resistencias obtenidas, se expresa con la formula.

Ecuación 26.

$$S^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2$$

13.1.2.3. Desviación Estándar

Como lo menciona la NTC 2275, puede considerarse como el radio de giro alrededor de la línea de simetría del área bajo la curva de distribución de frecuencia de los datos de resistencia (NTC 2275, 1997, pág. 7). Se expresa con la formula.

Ecuación 27.

$$S = \sqrt{S^2}$$

13.1.2.4. Coeficiente De Variación, V.

Desviación estándar expresada como porcentaje

Ecuación 28.

$$V = \frac{S}{\bar{X}} \times 100$$

13.2. COMPROBACIÓN DE NORMALIDAD DE DISEÑOS DE MEZCLA

Para comprobar si los diseños de mezcla antes mencionados tienen alguna validez para los respectivos análisis de calidad y curva de resistencia Vs Tiempo es necesario Utilizar las fórmulas estadísticas anteriormente mencionadas para cada uno de los diseños de mezcla.

Por lo que se encontraron los siguientes valores necesarios para realizar la curva de distribución normal.

13.2.1. COMPROBACIÓN DE NORMALIDAD DEL METODO DE FULLER, PARA UN RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 7 DÍAS

Tabla 43
Parámetros estadísticos método de Fuller 7 días

F	
Media	15.427
Error típico	0.348
Mediana	15.470
Moda	#N/D
Desviación estándar	1.203
Varianza de la muestra	1.448
Curtosis	-0.912
Coeficiente de asimetría	-0.411
Rango	3.845
Mínimo	13.280
Máximo	17.125
Suma	231.411
Cuenta	15.000
Nivel de confianza (90,0%)	
Error estándar	0.311
Límite de confianza izq.	13.038
Límite de confianza der.	17.817

Tomado de: Elaboración Propia

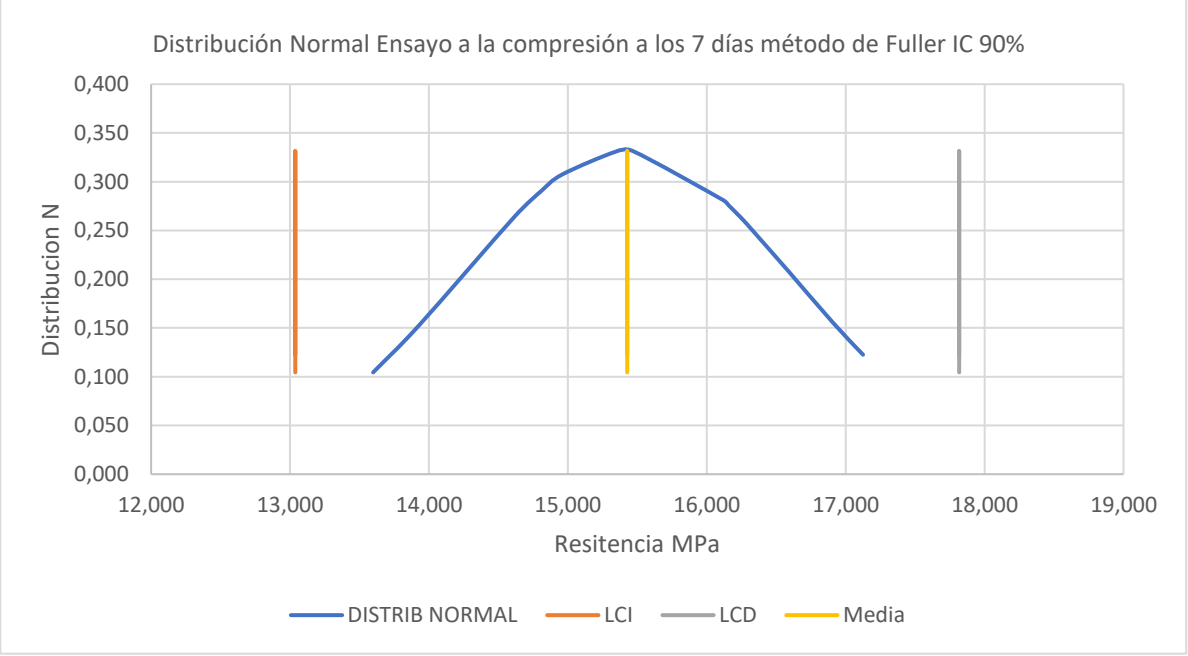
Tabla 44

Resultados ensayo de resistencia a la compresión a los 7 días para diseño de mezcla usando método de Fuller

	j	Resistencia MPa	DIST. NORMAL
FULLER RESISTENCIA 7 DIAS	1	13.598	0.104
	2	13.929	0.153
	3	14.617	0.264
	4	14.808	0.290
	5	14.961	0.307
	6	15.343	0.331
	7	15.470	0.331
	8	16.119	0.281
	9	16.157	0.276
	10	16.221	0.267
	11	16.285	0.257
	12	16.590	0.208
	13	16.590	0.208
	14	16.909	0.155
	15	17.125	0.123

Tomado de: Elaboración Propia

Ilustración 69 Curva de distribución normal, diseño de mezcla para el método de Fuller



Tomado de: Elaboración Propia

De la gráfica anterior, podemos observar que sigue un patrón de distribución normal como el que menciona la norma NTC 2275, esta tiende a ser alargada y baja, lo que indica variaciones menores en el diseño de mezcla, relación agua cemento constante y un adecuado proceso en la elaboración de ensayos a materiales.
El valor de la desviación estándar indica una dispersión moderada de los datos con relación a la media muestral de la resistencia a la compresión a los 7 días. Además, los datos de la tabla parámetros estadísticos terminaran de comprobar que los ensayos resultantes siguen una curva de distribución normal.

Algunas propiedades de la curva de distribución normal nos indican que:

- La media, moda y mediana, deben ser aproximadamente iguales, cumpliendo de esta manera el parámetro (media 15.427 -mediana 15.470)
- En relación al parámetro de curtosis que indica es el grado de aplanamiento de una distribución normal, los valores deben ser cero o tres. El valor de -0.912 obtenido es negativo y confirma que, aunque es cercano cero, la campana tiende al aplanamiento.
- Respecto al valor de asimetría este debe ser un valor nulo o cercano a cero, decreciendo de forma simétrica con respecto a la media muestral, este puede indicarnos la tendencia de los datos hacia la derecha o a la izquierda de la media muestral. En este caso el valor de asimetría -0.411 es cercano a cero y negativo por lo que se genera una pequeña asimetría de los datos hacia la izquierda.
- El rango de la muestra de un ensayo cuyos resultados se promedian puede calcularse al restar el menor valor de la resistencia del mayor valor, el rango y también puede usarse en la determinación de la desviación estándar.

De lo anterior, podemos decir que las muestras de concreto obtenidas por medio del diseño de mezcla con el método de Fuller y una resistencia a la compresión de 7 días, presenta un comportamiento normal.

13.2.2. COMPROBACIÓN DE NORMALIDAD DEL METODO DE CURVA DE LA TARÁNTULA, RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 7 DÍAS

Tabla 45
Parámetros estadísticos curva de la tarántula 7 días

	T
Media	12.967
Error típico	0.123893471
Mediana	12.872
Moda	#N/D
Desviación estándar	0.480
Varianza de la muestra	0.230
Curtosis	-0.204
Coeficiente de asimetría	-0.059
Rango	1.617
Mínimo	12.401
Máximo	14.018
Suma	194.512
Cuenta	15.000
Nivel de confianza (90,0%)	
Error estándar	0.124
Límite de confianza izq.	12.176
Límite de confianza der.	13.759

Tomado de: Elaboración Propia

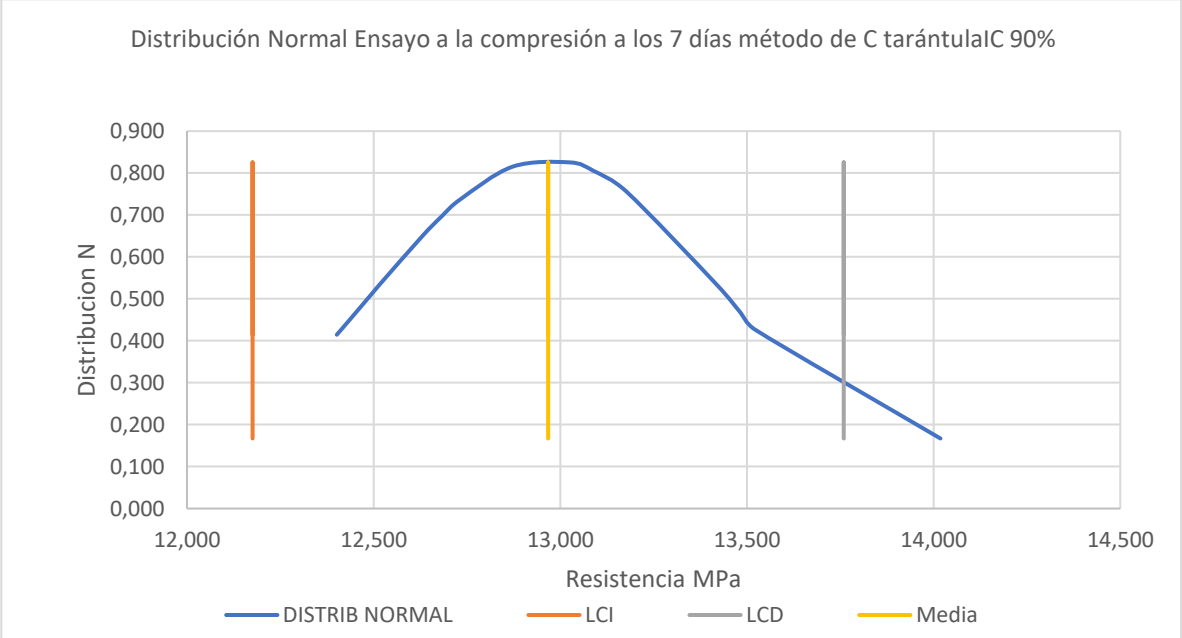
Tabla 46

Resultados ensayo de resistencia a la compresión a los 7 días para diseño de mezcla usando método de Curva de la tarántula

	j	Res. MPa	DISTRIB NORMAL
TARANTULA RESISTENCIA 7 DIAS	1	12.401	0.414
	2	12.440	0.454
	3	12.503	0.521
	4	12.516	0.534
	5	12.631	0.650
	6	12.681	0.696
	7	12.732	0.737
	8	12.872	0.815
	9	13.025	0.825
	10	13.089	0.805
	11	13.178	0.755
	12	13.420	0.533
	13	13.484	0.466
	14	13.522	0.427
	15	14.018	0.167

Tomado de: Elaboración Propia

Ilustración 70 Curva de distribución normal, diseño de mezcla usando método de Curva de la tarántula



Tomado de: Elaboración Propia

De la gráfica anterior, podemos observar que sigue un patrón de distribución normal como el que menciona la norma NTC 2275, esta tiende a ser alargada y baja, lo que indica variaciones menores en el diseño de mezcla, relación agua cemento constante y un adecuado proceso en la elaboración de ensayos a materiales.

El valor de la desviación estándar indica una dispersión moderada de los datos con relación a la media muestral de la resistencia a la compresión a los 7 días. Además, los datos de la tabla parámetros estadísticos terminaran de comprobar que los ensayos resultantes siguen una curva de distribución normal.

Algunas propiedades de la curva de distribución normal nos indican que:

- La media, moda y mediana, deben ser aproximadamente iguales, cumpliendo de esta manera el parámetro (media 12.967 -mediana 12.872)
- En relación al parámetro de curtosis que indica el grado de aplanamiento de una distribución normal, los valores deben ser cero o tres. El valor de -0.204 obtenido es negativo y confirma que, aunque es cercano al cero, la campana tiende al aplanamiento.
- Respecto al valor de asimetría este debe ser un valor nulo o cercano a cero, decreciendo de forma simétrica con respecto a la media muestral, este puede indicarnos la tendencia de los datos hacia la derecha o a la izquierda de la media muestral. En este caso el valor de asimetría -0.059 es cercano a cero y negativo por lo que se genera una pequeña asimetría de los datos hacia la izquierda.
- El rango de la muestra de un ensayo cuyos resultados se promedian puede calcularse al restar el menor valor de la resistencia del mayor valor, el rango y también puede usarse en la determinación de la desviación estándar.

De lo anterior, podemos decir que las muestras de concreto obtenidas por medio del diseño de mezcla con el método de curva de la tarántula y una resistencia a la compresión de 7 días, presenta un comportamiento normal.

13.2.3. COMPROBACIÓN DE NORMALIDAD DEL METODO DE MÍNIMOS CUADRADOS, RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 7 DÍAS

Tabla 47
Parámetros estadísticos método mínimos cuadrados 7 días

	M
Media	14.288
Error típico	0.158
Mediana	14.298
Moda	14.006
Desviación estándar	0.612
Varianza de la muestra	0.375
Curtosis	-0.636
Coeficiente de asimetría	-0.259
Rango	1.948
Mínimo	13.267
Máximo	15.215
Suma	214.324
Cuenta	15.000
Nivel de confianza (90,0%)	
Error estándar	0.158
Límite de confianza izq.	13.278
Límite de confianza der.	15.298

Tomado de: Elaboración Propia

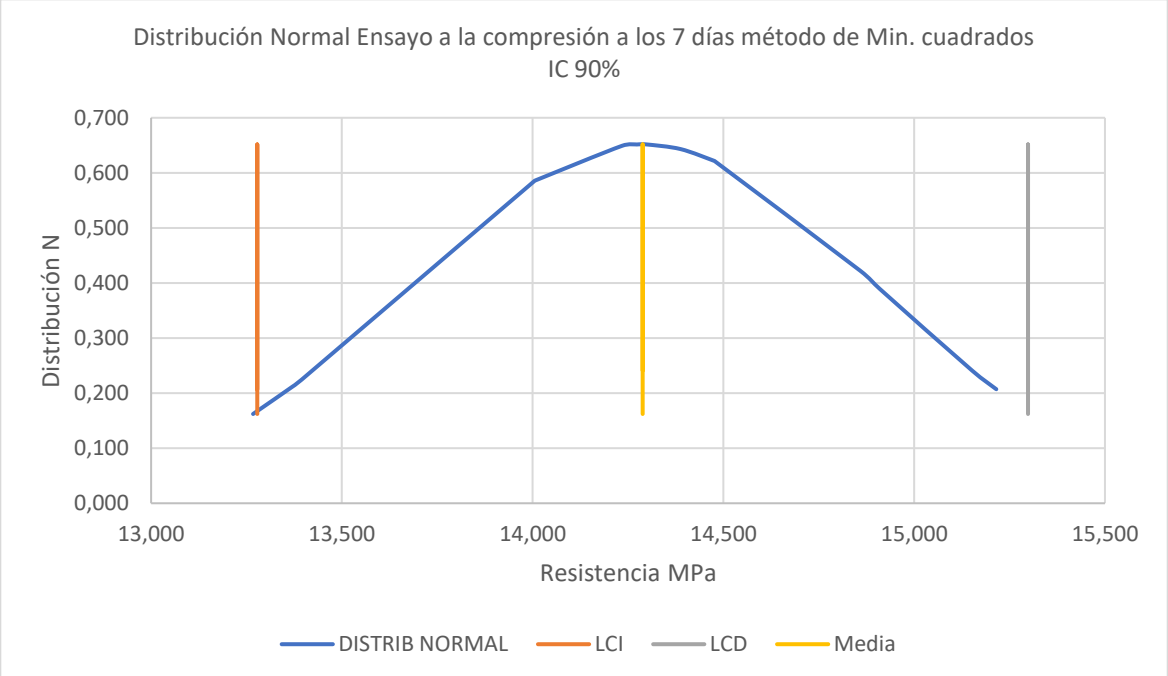
Tabla 48

Resultados ensayo de resistencia a la compresión a los 7 días para diseño de mezcla usando método de Mínimos cuadrados

	j	Res. MPa	DISTRIB NORMAL
MINIMOS CUADRADOSRESISTENCIA 7 DIAS	1	13.267	0.162
	2	13.369	0.211
	3	13.394	0.224
	4	14.006	0.586
	5	14.006	0.586
	6	14.235	0.649
	7	14.273	0.651
	8	14.298	0.652
	9	14.388	0.643
	10	14.477	0.622
	11	14.477	0.622
	12	14.859	0.422
	13	14.910	0.389
	14	15.152	0.241
	15	15.215	0.207

Tomado de: Elaboración Propia

Ilustración 71 Curva de distribución normal, diseño de mezcla usando método de Mínimos cuadrados



Tomado de: Elaboración Propia

De la gráfica anterior, podemos observar que sigue un patrón de distribución normal como el que menciona la norma NTC 2275, esta tiende a ser alargada y baja, lo que indica variaciones

menores en el diseño de mezcla, relación agua cemento constante y un adecuado proceso en la elaboración de ensayos a materiales.
El valor de la desviación estándar indica una dispersión moderada de los datos con relación a la media muestral de la resistencia a la compresión a los 7 días. Además, los datos de la tabla parámetros estadísticos terminaran de comprobar que los ensayos resultantes siguen una curva de distribución normal.

Algunas propiedades de la curva de distribución normal nos indican que:

- La media, moda y mediana, deben ser aproximadamente iguales, cumpliendo de esta manera el parámetro (media 14.288 -mediana 14.298)
- En relación al parámetro de curtosis que indica el grado de aplanamiento de una distribución normal, los valores deben ser cero o tres. El valor de -0.636 obtenido es negativo y confirma que, aunque es cercano al cero, la campana tiende al aplanamiento.
- Respecto al valor de asimetría este debe ser un valor nulo o cercano a cero, decreciendo de forma simétrica con respecto a la media muestral, este puede indicarnos la tendencia de los datos hacia la derecha o a la izquierda de la media muestral. En este caso el valor de asimetría -0.259 es cercano a cero y negativo por lo que se genera una pequeña asimetría de los datos hacia la izquierda.
- El rango de la muestra de un ensayo cuyos resultados se promedian puede calcularse al restar el menor valor de la resistencia del mayor valor, el rango y también puede usarse en la determinación de la desviación estándar.

De lo anterior, podemos decir que las muestras de concreto obtenidas por medio del diseño de mezcla con el método mínimos cuadrados y una resistencia a la compresión de 7 días, presenta un comportamiento normal.

13.2.4. COMPROBACIÓN DE NORMALIDAD DEL METODO DE SHILSTONE, RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 7 DÍAS

Tabla 49
Parámetros estadísticos método de Shilstone 7 días

S	
Media	11.937
Error típico	0.282
Mediana	11.714
Moda	#N/D
Desviación estándar	1.091
Varianza de la muestra	1.191
Curtosis	-0.710
Coeficiente de asimetría	-0.059
Rango	3.807
Mínimo	9.842
Máximo	13.649
Suma	179.055
Cuenta	15.000
Nivel de confianza (90,0%)	
Error estándar	0.282
Límite de confianza izq.	10.136
Límite de confianza der.	13.738

Tomado de: Elaboración Propia

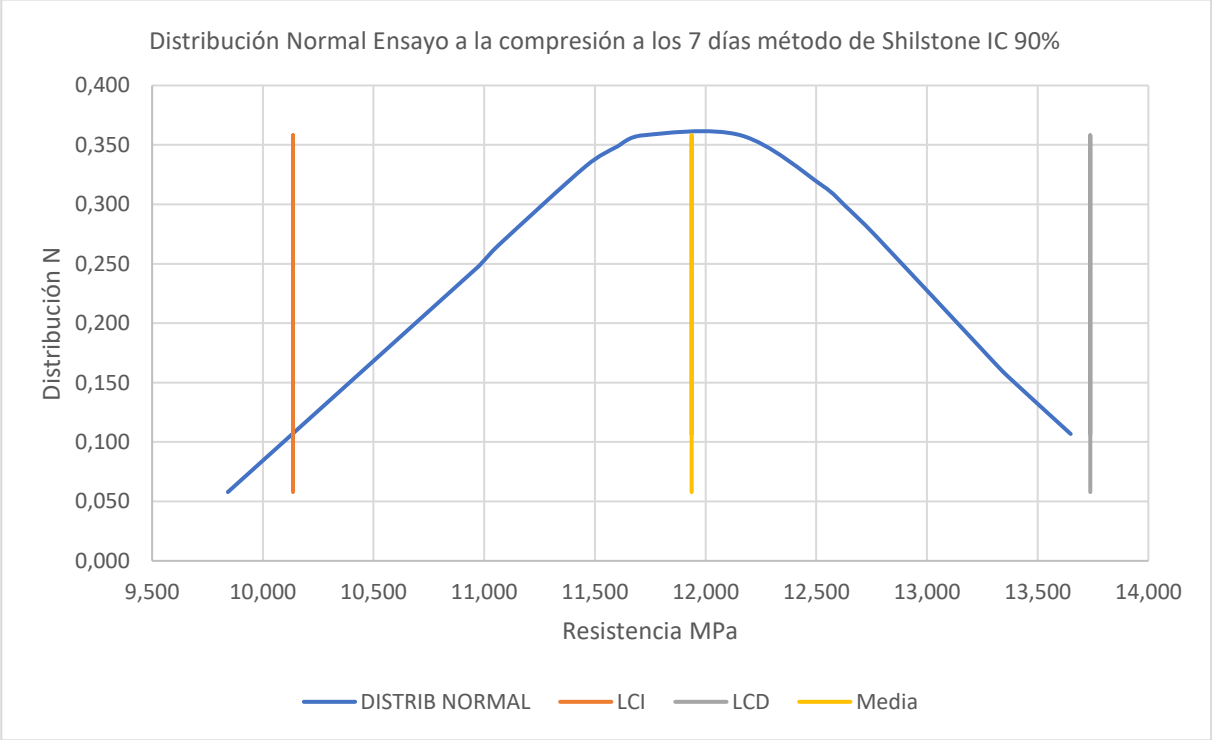
Tabla 50

Resultados ensayo de resistencia a la compresión a los 7 días para diseño de mezcla usando método de Shilstone

	j	Res. MPa	DISTRIB NORMAL
SHILSTONE RESISTENCIA 7 DIAS	1	9.842	0.058
	2	10.975	0.248
	3	10.988	0.250
	4	11.001	0.253
	5	11.064	0.266
	6	11.459	0.332
	7	11.599	0.348
	8	11.714	0.358
	9	12.159	0.358
	10	12.529	0.316
	11	12.631	0.299
	12	12.771	0.273
	13	13.305	0.167
	14	13.369	0.155
	15	13.649	0.107

Tomado de: Elaboración Propia

Ilustración 72 Curva de distribución normal, diseño de mezcla usando método de Shilstone



Tomado de: Elaboración Propia

De la gráfica anterior, podemos observar que sigue un patrón de distribución normal como el que menciona la norma NTC 2275, esta tiende a ser alargada y baja, lo que indica variaciones menores en el diseño de mezcla, relación agua cemento constante y un adecuado proceso en la elaboración de ensayos a materiales.

El valor de la desviación estándar indica una dispersión moderada de los datos con relación a la media muestral de la resistencia a la compresión a los 7 días. Además, los datos de la tabla parámetros estadísticos terminaran de comprobar que los ensayos resultantes siguen una curva de distribución normal.

Algunas propiedades de la curva de distribución normal nos indican que:

- La media, moda y mediana, deben ser aproximadamente iguales, cumpliendo de esta manera el parámetro (media 11.937 -mediana 11.713)
- En relación al parámetro de curtosis que indica el grado de aplanamiento de una distribución normal, los valores deben ser cero o tres. El valor de -0.710 obtenido es negativo y confirma que, aunque es cercano al cero, la campana tiende al aplanamiento.
- Respecto al valor de asimetría este debe ser un valor nulo o cercano a cero, decreciendo de forma simétrica con respecto a la media muestral, este puede indicarnos la tendencia de los datos hacia la derecha o a la izquierda de la media muestral. En este caso el valor de asimetría -0.059 es cercano a cero y negativo por lo que se genera una pequeña asimetría de los datos hacia la izquierda.
- El rango de la muestra de un ensayo cuyos resultados se promedian puede calcularse al restar el menor valor de la resistencia del mayor valor, el rango y también puede usarse en la determinación de la desviación estándar.

De lo anterior, podemos decir que las muestras de concreto obtenidas por medio del diseño de mezcla con el método Shilstone y una resistencia a la compresión de 7 días, presenta un comportamiento normal.

13.2.5. COMPROBACIÓN DE NORMALIDAD DEL METODO DE FULLER, RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 28 DÍAS

Tabla 51
Parámetros estadísticos método de Fuller

F	
Media	23.536
Error típico	0.237
Mediana	23.803
Moda	24.123
Desviación estándar	0.919
Varianza de la muestra	0.845
Curtosis	2.527
Coeficiente de asimetría	-1.511
Rango	3.579
Mínimo	21.076
Máximo	24.655
Suma	353.043
Cuenta	15.000
Nivel de confianza (90,0%)	
Error estándar	0.237
Límite de confianza izq.	22.020
Límite de confianza der.	25.053

Tomado de: Elaboración Propia

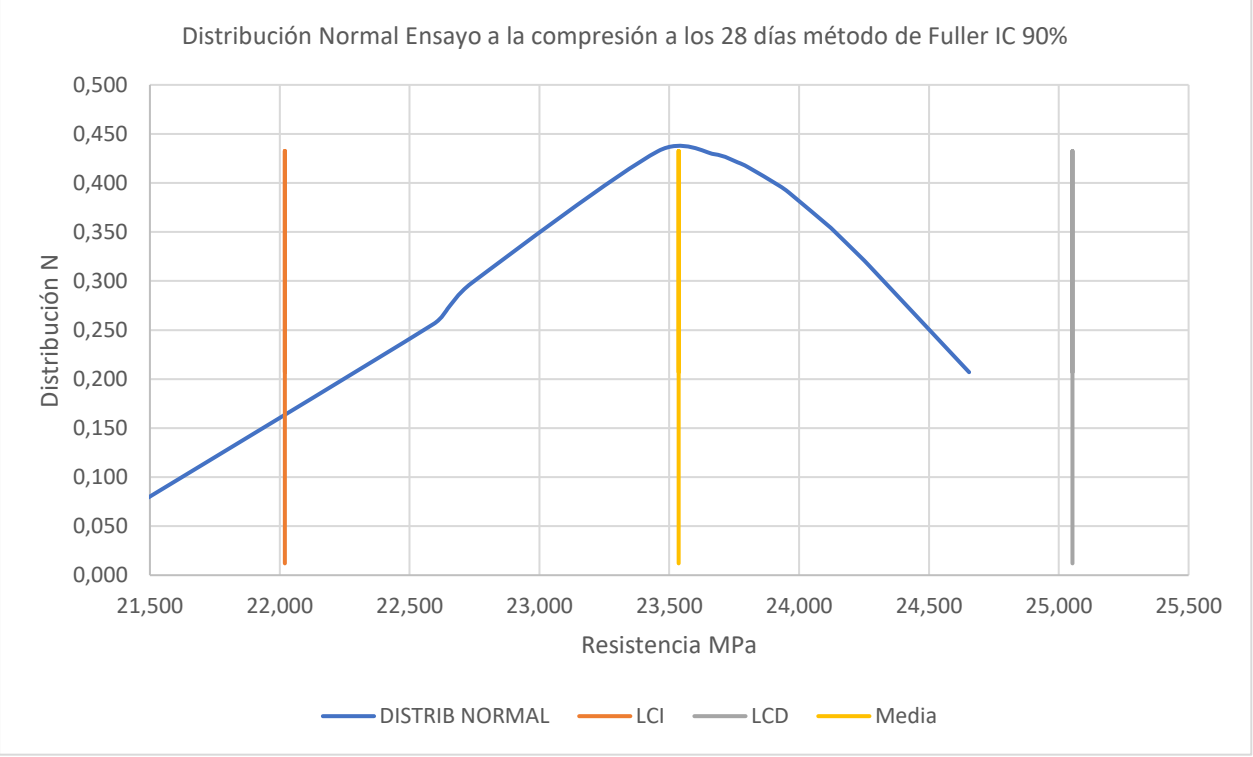
Tabla 52

Resultados ensayo de resistencia a la compresión a los 28 días para diseño de mezcla usando método Fuller

	j	Res. MPa	DISTRIB NORMAL
FULLER RESISTENCIA 28 DIAS	1	21.076	0.012
	2	22.592	0.256
	3	22.646	0.271
	4	22.739	0.298
	5	23.457	0.432
	6	23.670	0.429
	7	23.763	0.421
	8	23.803	0.416
	9	23.923	0.397
	10	23.963	0.390
	11	24.123	0.354
	12	24.123	0.354
	13	24.242	0.323
	14	24.269	0.316
	15	24.655	0.207

Tomado de: Elaboración Propia

Ilustración 73 Curva de distribución normal, diseño de mezcla usando método de Fuller



Tomado de: Elaboración Propia

De la gráfica anterior, podemos observar que sigue un patrón de distribución normal como el que menciona la norma NTC 2275, esta tiende a ser alargada y baja, lo que indica variaciones menores en el diseño de mezcla, relación agua cemento constante y un adecuado proceso en la elaboración de ensayos a materiales.
El valor de la desviación estándar indica una dispersión moderada de los datos con relación a la media muestral de la resistencia a la compresión a los 28 días. Además, los datos de la tabla parámetros estadísticos terminaran de comprobar que los ensayos resultantes siguen una curva de distribución normal.

Algunas propiedades de la curva de distribución normal nos indican que:

- La media, moda y mediana, deben ser aproximadamente iguales, cumpliendo de esta manera el parámetro (media 23.536 -mediana 23.803 - Moda 24.123)

- En relación al parámetro de curtosis que indica el grado de aplanamiento de una distribución normal, los valores deben ser cero o tres. El valor de 2.527 obtenido es Positivo y confirma que, es cercano al tres, la campana tiende al alargamiento.

- Respecto al valor de asimetría este debe ser un valor nulo o cercano a cero, decreciendo de forma simétrica con respecto a la media muestral, este puede indicarnos la tendencia de los datos hacia la derecha o a la izquierda de la media muestral. En este caso el valor de asimetría -1.511 no es cercano a cero y es un valor negativo por lo que se genera una asimetría de los datos hacia la izquierda.

- El rango de la muestra de un ensayo cuyos resultados se promedian puede calcularse al restar el menor valor de la resistencia del mayor valor, el rango y también puede usarse en la determinación de la desviación estándar.

De lo anterior, podemos decir que las muestras de concreto obtenidas por medio del diseño de mezcla con el método Fuller y una resistencia a la compresión de 28 días, presenta un comportamiento normal.

13.2.6. COMPROBACIÓN DE NORMALIDAD DEL METODO DE CURVA DE LA TARÁNTULA, RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 28 DÍAS

Tabla 53
Parámetros estadísticos Curva de la tarántula 28 días

	T
Media	21.751
Error típico	0.411876669
Mediana	21.887
Moda	#N/D
Desviación estándar	1.595
Varianza de la muestra	2.545
Curtosis	3.899
Coeficiente de asimetría	0.602
Rango	6.226
Mínimo	17.227
Máximo	23.453
Suma	326.267
Cuenta	15.000
Nivel de confianza (90,0%)	
Error estándar	0.411876669
Límite de confianza izq.	19.119
Límite de confianza der.	24.383

Tomado de: Elaboración Propia

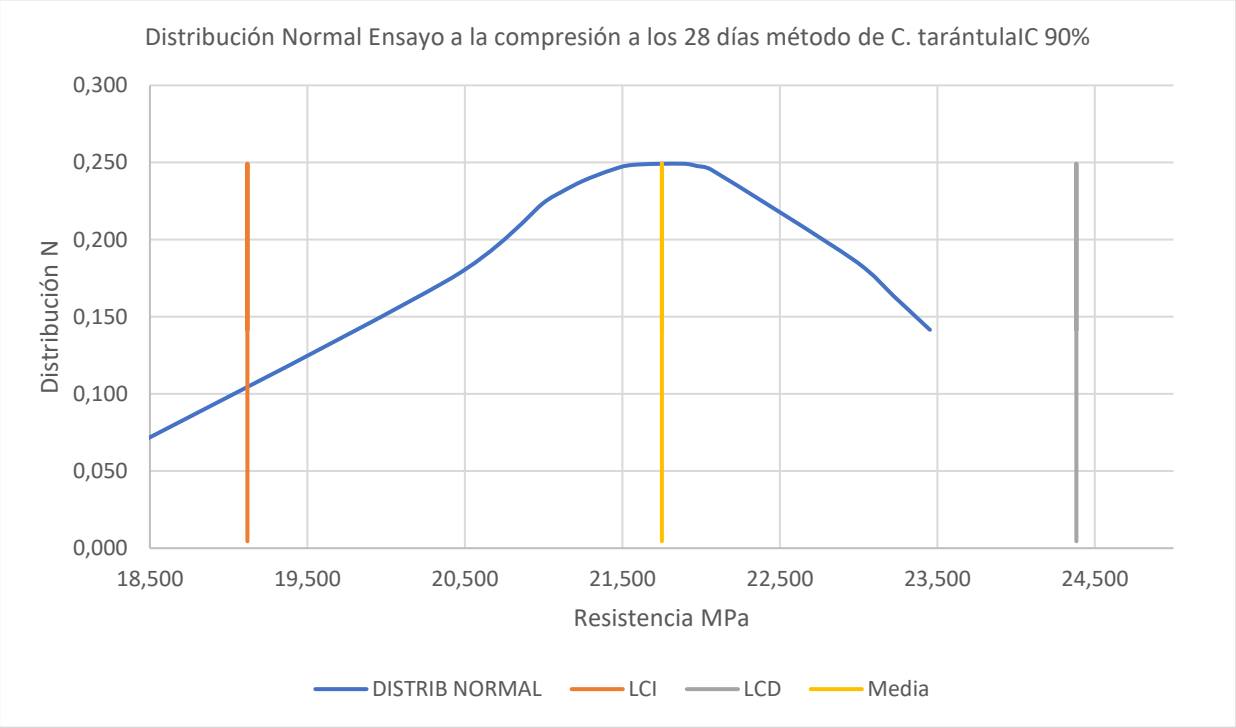
Tabla 54

Resultados ensayo de resistencia a la compresión a los 28 días para diseño de mezcla usando método Curva de la Tarántula

	j	Res. MPa	DISTRIB NORMAL
TARANTULA RESISTENCIA 28 DIAS	1	17.227	0.004
	2	20.385	0.173
	3	20.996	0.224
	4	21.110	0.231
	5	21.250	0.238
	6	21.429	0.245
	7	21.569	0.248
	8	21.887	0.249
	9	21.976	0.248
	10	22.065	0.245
	11	22.969	0.187
	12	23.224	0.163
	13	23.351	0.151
	14	23.377	0.149
	15	23.453	0.142

Tomado de: Elaboración Propia

Ilustración 74 Curva de distribución normal, diseño de mezcla usando método de Curva de la Tarántula



Tomado de: Elaboración Propia

De la gráfica anterior, podemos observar que sigue un patrón de distribución normal como el que menciona la norma NTC 2275, esta tiende a ser alargada y baja, lo que indica variaciones menores en el diseño de mezcla, relación agua cemento constante y un adecuado proceso en la elaboración de ensayos a materiales.

El valor de la desviación estándar indica una dispersión moderada de los datos con relación a la media muestral de la resistencia a la compresión a los 28 días. Además, los datos de la tabla

parámetros estadísticos terminaran de comprobar que los ensayos resultantes siguen una curva de distribución normal.

Algunas propiedades de la curva de distribución normal nos indican que:

- La media, moda y mediana, deben ser aproximadamente iguales, cumpliendo de esta manera el parámetro (media 21.751 -mediana 21.887)

- En relación al parámetro de curtosis que indica el grado de aplanamiento de una distribución normal, los valores deben ser cero o tres. El valor de 3.899 obtenido es Positivo y confirma que, es cercano al tres, la campana tiende al alargamiento.

- Respecto al valor de asimetría este debe ser un valor nulo o cercano a cero, decreciendo de forma simétrica con respecto a la media muestral, este puede indicarnos la tendencia de los datos hacia la derecha o a la izquierda de la media muestral. En este caso el valor de asimetría 0.603 es cercano a cero y es un valor positivo por lo que se genera una ligera asimetría de los datos hacia la derecha.

- El rango de la muestra de un ensayo cuyos resultados se promedian puede calcularse al restar el menor valor de la resistencia del mayor valor, el rango y también puede usarse en la determinación de la desviación estándar.

De lo anterior, podemos decir que las muestras de concreto obtenidas por medio del diseño de mezcla con el método Curva de la tarántula y una resistencia a la compresión de 28 días, presenta un comportamiento normal.

13.2.7. COMPROBACIÓN DE NORMALIDAD DEL METODO DE MÍNIMOS CUADRADOS, RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 28 DÍAS

Tabla 55
Parámetros estadísticos Min. cuadrados 28 días

	M
Media	21.376
Error típico	0.142313487
Mediana	21.441
Moda	#N/D
Desviación estándar	0.551
Varianza de la muestra	0.304
Curtosis	0.064
Coeficiente de asimetría	-0.631
Rango	1.961
Mínimo	20.143
Máximo	22.103
Suma	320.639
Cuenta	15.000
Nivel de confianza (90,0%)	
Error estándar	0.142313487
Límite de confianza izq	20.467
Límite de confianza der	22.285

Tomado de: Elaboración Propia

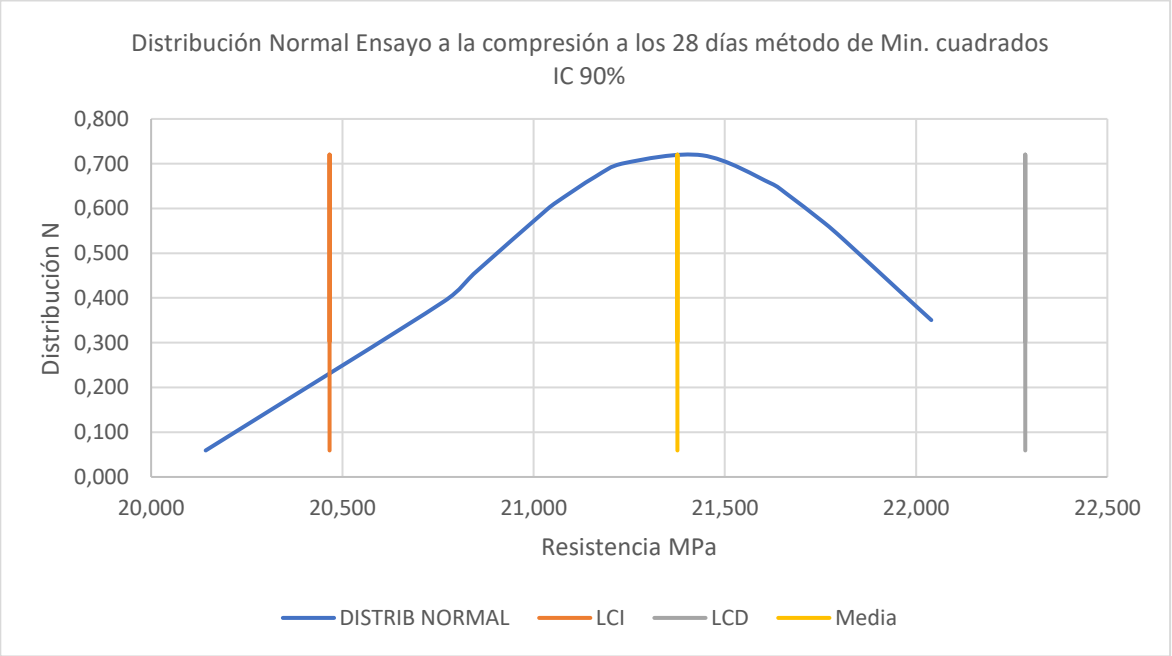
Tabla 56

Resultados ensayo de resistencia a la compresión a los 28 días para diseño de mezcla usando método Curva de la Tarántula

	j	Res MPa	DISTRIB NORMAL
MINIMOS CUADRADOS RESISTENCIA 28 DIAS	1	20.143	0.000
	2	20.766	0.000
	3	20.843	0.000
	4	21.034	0.000
	5	21.059	0.000
	6	21.161	0.000
	7	21.238	0.000
	8	21.441	0.000
	9	21.620	0.000
	10	21.658	0.000
	11	21.760	0.000
	12	21.811	0.000
	13	21.963	0.000
	14	22.040	0.000
	15	22.103	0.000

Tomado de: Elaboración Propia

Ilustración 75 Curva de distribución normal, diseño de mezcla usando método de Mínimos cuadrados



Tomado de: Elaboración Propia

De la gráfica anterior, podemos observar que sigue un patrón de distribución normal como el que menciona la norma NTC 2275, esta tiende a ser alargada y baja, lo que indica variaciones menores en el diseño de mezcla, relación agua cemento constante y un adecuado proceso en la elaboración de ensayos a materiales.

El valor de la desviación estándar indica una dispersión moderada de los datos con relación a la media muestral de la resistencia a la compresión a los 28 días. Además, los datos de la tabla parámetros estadísticos terminaran de comprobar que los ensayos resultantes siguen una curva de distribución normal.

Algunas propiedades de la curva de distribución normal nos indican que:

- La media, moda y mediana, deben ser aproximadamente iguales, cumpliendo de esta manera el parámetro (media 21.376 -mediana 21.441)
- En relación al parámetro de curtosis que indica el grado de aplanamiento de una distribución normal, los valores deben ser cero o tres. El valor de 0.064 obtenido es Positivo y confirma que, es cercano al cero, la campana tiende al alargamiento.
- Respecto al valor de asimetría este debe ser un valor nulo o cercano a cero, decreciendo de forma simétrica con respecto a la media muestral, este puede indicarnos la tendencia de los datos hacia la derecha o a la izquierda de la media muestral. En este caso el valor de asimetría -0.631 es cercano a cero y es un valor negativo por lo que se genera una ligera asimetría de los datos hacia la Izquierda.
- El rango de la muestra de un ensayo cuyos resultados se promedian puede calcularse al restar el menor valor de la resistencia del mayor valor, el rango y también puede usarse en la determinación de la desviación estándar.

De lo anterior, podemos decir que las muestras de concreto obtenidas por medio del diseño de mezcla con el método Mínimos cuadrados y una resistencia a la compresión de 28 días, presenta un comportamiento normal.

13.2.8. COMPROBACIÓN DE NORMALIDAD DEL METODO DE SHILSTONE, RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 28 DÍAS

Tabla 57
Parámetros estadísticos Shilstone 28 días

	S
Media	18.076
Error típico	0.376678765
Mediana	17.590
Moda	#N/D
Desviación estándar	1.459
Varianza de la muestra	2.128
Curtosis	-0.078
Coeficiente de asimetría	0.602
Rango	5.345
Mínimo	15.864
Máximo	21.209
Suma	271.139
Cuenta	15.000
Nivel de confianza (90,0%)	
Error estándar	0.376678765
Límite de confianza izq.	15.669
Límite de confianza der.	20.483

Tomado de: Elaboración Propia

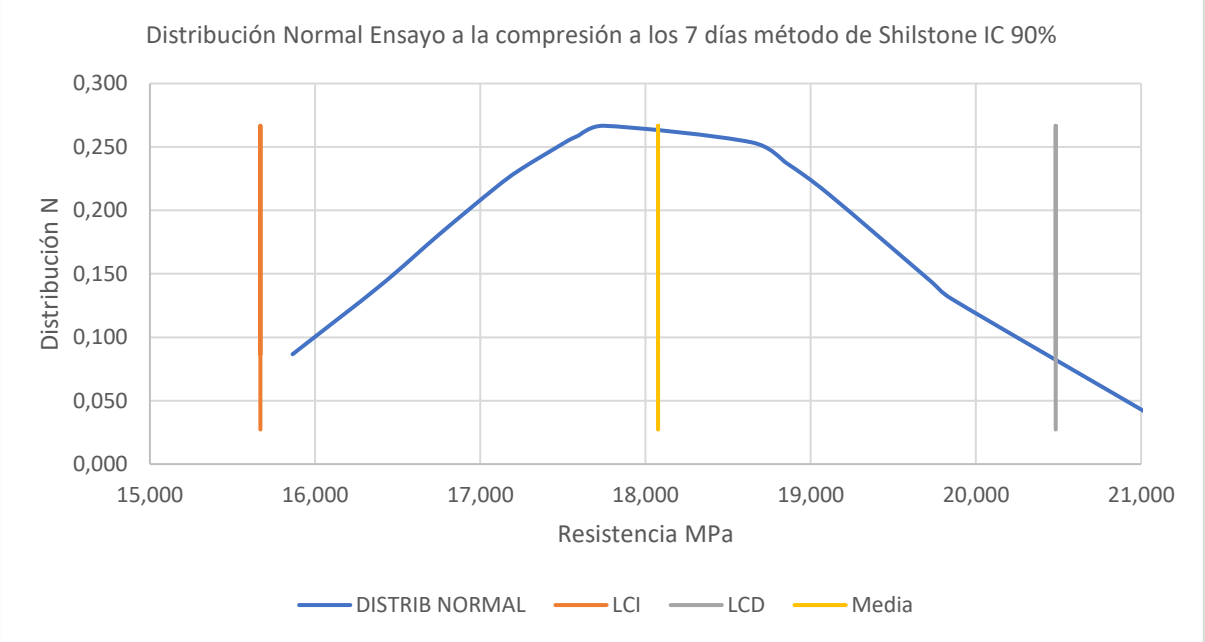
Tabla 58

Resultados ensayo de resistencia a la compresión a los 28 días para diseño de mezcla usando método Shilstone

	j	Res. MPa	DISTRIB NORMAL
SHILSTONE RESISTENCIA 28 DIAS	1	15.864	0.087
	2	16.393	0.141
	3	16.751	0.181
	4	17.084	0.217
	5	17.241	0.232
	6	17.532	0.255
	7	17.536	0.255
	8	17.590	0.259
	9	17.749	0.267
	10	18.641	0.254
	11	18.859	0.237
	12	19.106	0.213
	13	19.732	0.144
	14	19.852	0.130
	15	21.209	0.027

Tomado de: Elaboración Propia

Ilustración 76 Curva de distribución normal, diseño de mezcla usando método de Shilstone



Tomado de: Elaboración Propia

De la gráfica anterior, podemos observar que sigue un patrón de distribución normal como el que menciona la norma NTC 2275, esta tiende a ser alargada y baja, lo que indica variaciones menores en el diseño de mezcla, relación agua cemento constante y un adecuado proceso en la elaboración de ensayos a materiales.

El valor de la desviación estándar indica una dispersión moderada de los datos con relación a la media muestral de la resistencia a la compresión a los 28 días. Además, los datos de la tabla parámetros estadísticos terminaran de comprobar que los ensayos resultantes siguen una curva de distribución normal.

Algunas propiedades de la curva de distribución normal nos indican que:

- La media, moda y mediana, deben ser aproximadamente iguales, cumpliendo de esta manera el parámetro (media 18.076 -mediana 17.590)
- En relación al parámetro de curtosis que indica el grado de aplanamiento de una distribución normal, los valores deben ser cero o tres. El valor de -0.078 obtenido es negativo además es cercano al cero, la campana tiende a ser plana.
- Respecto al valor de asimetría este debe ser un valor nulo o cercano a cero, decreciendo de forma simétrica con respecto a la media muestral, este puede indicarnos la tendencia de los datos hacia la derecha o a la izquierda de la media muestral. En este caso el valor de asimetría 0.602 es cercano a cero y es un valor positivo por lo que se genera una ligera asimetría de los datos hacia la derecha.
- El rango de la muestra de un ensayo cuyos resultados se promedian puede calcularse al restar el menor valor de la resistencia del mayor valor, el rango y también puede usarse en la determinación de la desviación estándar.

De lo anterior, podemos decir que las muestras de concreto obtenidas por medio del diseño de mezcla con el método Shilstone y una resistencia a la compresión de 28 días, presenta un comportamiento normal.

13.3. PRUEBA DE NORMALIDAD DE KOLMOGOROV-SMIRNOV

Usando los datos de resistencia a la compresión de los diferentes diseños de mezcla y para tener certeza de que la muestra sigue una distribución normal, se usa la prueba de Kolmogórov-Smirnov, en esta se busca el rechazo o aceptación de la hipótesis nula, la cual siempre parte del hecho, de que la muestra sigue una distribución normal, si el valor Kd o estadístico de prueba es mayor que el valor k crítico, la hipótesis se rechaza y la muestra no sigue este tipo de distribución, si por el contrario el valor Kd o estadístico de prueba es menor al valor K crítico, la hipótesis se acepta y la muestra sigue una distribución normal donde :

Ecuación 29.

$$Kd = max_{1 \le i \le N} \left(F(Y_i) - \frac{i-1}{N}, \frac{i}{N} - F(Y_i) \right)$$

$$Pi = \frac{J}{N}$$

$$Zi = \frac{Res\ MPa - \bar{X}}{S}$$

$$P(zi) = distribución\ normal\ estandar\ (Zi)$$

A continuación, se muestra los resultados de la prueba de normalidad de Kolmogórov-Smirnov para cada uno de los diseños de mezcla realizados a los 7 y 28 días.

13.3.1. PRUEBA DE NORMALIDAD DE KOLMOGOROV-SMIRNOV DISEÑO DE MEZCLA USANDO METODO DE FULLER, RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 7 DÍAS

Tabla 59

Datos prueba de normalidad de Kolmogorov – Smirnov para diseño de mezcla método Fuller 7 días

j	Res. MPa	pi	Zi	P(Zi)	l P(zi)-Pi l	l P(Zi)-P(i-1) l
1	13.6	0.067	-1.901	0.029	0.038	0.029
2	13.9	0.133	-1.594	0.055	0.078	0.011
3	14.6	0.200	-0.956	0.169	0.031	0.036
4	14.8	0.267	-0.779	0.218	0.049	0.018
5	15.0	0.333	-0.637	0.262	0.071	0.005
6	15.3	0.400	-0.283	0.388	0.012	0.055
7	15.5	0.467	-0.165	0.434	0.032	0.034
8	16.1	0.533	0.437	0.669	0.136	0.202
9	16.2	0.600	0.472	0.682	0.082	0.148
10	16.2	0.667	0.531	0.702	0.036	0.102
11	16.3	0.733	0.590	0.722	0.011	0.056
12	16.6	0.800	0.874	0.809	0.009	0.075
13	16.6	0.867	0.874	0.809	0.058	0.009
14	16.9	0.933	1.169	0.879	0.055	0.012
15	17.1	1.000	1.369	0.915	0.085	0.019

Tomado de: Elaboración Propia

Tabla 60

Comparación Kd o estadístico de prueba vs k critico nivel de confianza de 95%

K.s estadístico de prueba D	0.202		
nivel de significación	90%	95%	99%
K.s valor critico tablas	0.304	0.338	0.404

Tomado de: Elaboración Propia

Como puede observarse en la tabla de comparación el estadístico de prueba de Kolmogorov – Smirnov es menor que le valor crítico, por lo tanto, se acepta la hipótesis nula y se comprueba que la muestra sigue una distribución normal para el diseño de mezcla usando el método de Fuller y desarrollo a la resistencia a los 7 días.

13.3.2. PRUEBA DE NORMALIDAD DE KOLMOGOROV-SMIRNOV DISEÑO DE MEZCLA USANDO METODO DE CURVA DE LA TARANTULA, RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 7 DÍAS

Tabla 61

Datos prueba de normalidad de Kolmogorov – Smirnov para diseño de mezcla método Curva de la tarántula 7 días

j	Res. MPa	pi	Zi	P(Zi)	l P(zi)-Pi l	l P(Zi)-P(i-1) l
1	13.3	0.067	-1.668	0.048	0.019	0.048
2	13.4	0.133	-1.502	0.067	0.067	0.000
3	13.4	0.200	-1.460	0.072	0.128	0.061
4	14.0	0.267	-0.462	0.322	0.055	0.122
5	14.0	0.333	-0.462	0.322	0.011	0.055
6	14.2	0.400	-0.087	0.465	0.065	0.132
7	14.3	0.467	-0.025	0.490	0.023	0.090
8	14.3	0.533	0.017	0.507	0.027	0.040
9	14.4	0.600	0.162	0.564	0.036	0.031
10	14.5	0.667	0.308	0.621	0.046	0.021
11	14.5	0.733	0.308	0.621	0.112	0.046
12	14.9	0.800	0.932	0.824	0.024	0.091
13	14.9	0.867	1.015	0.845	0.022	0.045
14	15.2	0.933	1.410	0.921	0.013	0.054
15	15.2	1.000	1.514	0.935	0.065	0.002

Tomado de: Elaboración Propia

Tabla 62

Comparación Kd o estadístico de prueba vs k critico nivel de confianza 95%

K.s estadístico de prueba D	0.155		
	90%	95%	99%
K.s valor critico tablas	0.304	0.338	0.404

Tomado de: Elaboración Propia

Como puede observarse en la tabla de comparación el estadístico de prueba de Kolmogorov – Smirnov es menor que le valor crítico, por lo tanto, se acepta la hipótesis nula y se comprueba que la muestra sigue una distribución normal para el diseño de mezcla usando el método de Curva de la tarántula y desarrollo a la resistencia a los 7 días.

13.2.3. PRUEBA DE NORMALIDAD DE KOLMOGOROV-SMIRNOV DISEÑO DE MEZCLA USANDO METODO DE MÍNIMOS CUADRADOS, RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 7 DÍAS

Tabla 63

Datos prueba de normalidad de Kolmogorov – Smirnov para diseño de mezcla método Mínimos cuadrados 7 días

j	Res. MPa	pi	Zi	P(Zi)	l P(zi)-Pi l	l P(Zi)-P(i-1) l
1	13.3	0.067	-1.668	0.048	0.019	0.048
2	13.4	0.133	-1.502	0.067	0.067	0.000
3	13.4	0.200	-1.460	0.072	0.128	0.061
4	14.0	0.267	-0.462	0.322	0.055	0.122
5	14.0	0.333	-0.462	0.322	0.011	0.055
6	14.2	0.400	-0.087	0.465	0.065	0.132
7	14.3	0.467	-0.025	0.490	0.023	0.090
8	14.3	0.533	0.017	0.507	0.027	0.040
9	14.4	0.600	0.162	0.564	0.036	0.031
10	14.5	0.667	0.308	0.621	0.046	0.021
11	14.5	0.733	0.308	0.621	0.112	0.046
12	14.9	0.800	0.932	0.824	0.024	0.091
13	14.9	0.867	1.015	0.845	0.022	0.045
14	15.2	0.933	1.410	0.921	0.013	0.054
15	15.2	1.000	1.514	0.935	0.065	0.002

Tomado de: Elaboración Propia

Tabla 64

Comparación Kd o estadístico de prueba vs k critico nivel de confianza 95%

K.s estadístico de prueba D	0.132		
	90%	95%	99%
K.s valor critico tablas	0.304	0.338	0.404

Tomado de: Elaboración Propia

Como puede observarse en la tabla de comparación el estadístico de prueba de Kolmogorov – Smirnov es menor que le valor crítico, por lo tanto, se acepta la hipótesis nula y se comprueba que la muestra sigue una distribución normal para el diseño de mezcla usando el método de Mínimos cuadrados y desarrollo a la resistencia a los 7 días.

13.2.4. PRUEBA DE NORMALIDAD DE KOLMOGOROV-SMIRNOV DISEÑO DE MEZCLA USANDO METODO DE SHILSTONE, RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 7 DÍAS

Tabla 65

Datos prueba de normalidad de Kolmogorov – Smirnov para diseño de mezcla método de Shilstone 7 días

j	Res. MPa	pi	Zi	P(Zi)	l P(zi)-Pi l	l P(Zi)-P(i-1) l
1	9.8	0.067	-1.920	0.027	0.039	-1.920
2	11.0	0.133	-0.881	0.189	0.056	0.122
3	11.0	0.200	-0.870	0.192	0.008	0.059
4	11.0	0.267	-0.858	0.195	0.071	0.005
5	11.1	0.333	-0.800	0.212	0.121	0.055
6	11.5	0.400	-0.438	0.331	0.069	0.003
7	11.6	0.467	-0.310	0.378	0.088	0.022
8	11.7	0.533	-0.205	0.419	0.114	0.048
9	12.2	0.600	0.204	0.581	0.019	0.047
10	12.5	0.667	0.542	0.706	0.039	0.106
11	12.6	0.733	0.635	0.737	0.004	0.071
12	12.8	0.800	0.764	0.778	0.022	0.044
13	13.3	0.867	1.254	0.895	0.028	0.095
14	13.4	0.933	1.312	0.905	0.028	0.039
15	13.6	1.000	1.569	0.942	0.058	0.008

Tomado de: Elaboración Propia

Tabla 66

Comparación Kd o estadístico de prueba vs k critico nivel de confianza 95%

K.s estadístico de prueba D	0.122		
	90%	95%	99%
K.s valor critico tablas	0.304	0.338	0.404

Tomado de: Elaboración Propia

Como puede observarse en la tabla de comparación el estadístico de prueba de Kolmogorov – Smirnov es menor que le valor crítico, por lo tanto, se acepta la hipótesis nula y se comprueba que la muestra sigue una distribución normal para el diseño de mezcla usando el método de Shilstone y desarrollo a la resistencia a los 7 días.

13.2.5. PRUEBA DE NORMALIDAD DE KOLMOGOROV-SMIRNOV DISEÑO DE MEZCLA USANDO METODO DE FULLER, RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 28 DÍAS

Tabla 67
Datos prueba de normalidad de Kolmogorov – Smirnov para diseño de mezcla método Fuller 28 días

j	Res. MPa	pi	Zi	P(Zi)	l P(zi)-Pi l	l P(Zi)-P(i-1) l
1	21.1	0.067	-4.113	0.000	0.067	0.000
2	22.6	0.133	-1.747	0.040	0.093	0.026
3	22.6	0.200	-1.664	0.048	0.152	0.085
4	22.7	0.267	-1.518	0.064	0.202	0.136
5	23.5	0.333	-0.397	0.346	0.012	0.079
6	23.7	0.400	-0.065	0.474	0.074	0.141
7	23.8	0.467	0.080	0.532	0.065	0.132
8	23.8	0.533	0.142	0.557	0.023	0.090
9	23.9	0.600	0.329	0.629	0.029	0.096
10	24.0	0.667	0.391	0.652	0.014	0.052
11	24.1	0.733	0.641	0.739	0.006	0.072
12	24.1	0.800	0.641	0.739	0.061	0.006
13	24.2	0.867	0.827	0.796	0.071	0.004
14	24.3	0.933	0.869	0.808	0.126	0.059
15	24.7	1.000	1.471	0.929	0.071	0.004

Tomado de: Elaboración Propia

Tabla 68
Comparación Kd o estadístico de prueba vs k critico nivel de confianza 95%

K.s estadístico de prueba D	0.202		
	90%	95%	99%
K.s valor critico tablas	0.304	0.338	0.404

Tomado de: Elaboración Propia

Como puede observarse
en la tabla de comparación el estadístico de prueba de Kolmogorov – Smirnov es menor que le valor crítico, por lo tanto, se acepta la hipótesis nula y se comprueba que la muestra sigue una distribución normal para el diseño de mezcla usando el método de Fuller y desarrollo a la resistencia a los 28 días.

13.2.6. PRUEBA DE NORMALIDAD DE KOLMOGOROV-SMIRNOV DISEÑO DE MEZCLA USANDO METODO DE CURVA DE LA TARANTULA, RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 28 DÍAS

Tabla 69

Datos prueba de normalidad de Kolmogorov – Smirnov para diseño de mezcla método Curva de la tarántula 28 días

j	Res. MPa	pi	Zi	P(Zi)	l P(zi)-Pi l	l P(Zi)-P(i-1) l
1	17.2	0.067	-2.836	0.002	0.064	0.002
2	20.4	0.133	-0.857	0.196	0.062	0.129
3	21.0	0.200	-0.474	0.318	0.118	0.185
4	21.1	0.267	-0.402	0.344	0.077	0.144
5	21.3	0.333	-0.314	0.377	0.043	0.110
6	21.4	0.400	-0.202	0.420	0.020	0.087
7	21.6	0.467	-0.114	0.454	0.012	0.054
8	21.9	0.533	0.085	0.534	0.001	0.067
9	22.0	0.600	0.141	0.556	0.044	0.023
10	22.1	0.667	0.197	0.578	0.089	0.022
11	23.0	0.733	0.764	0.777	0.044	0.111
12	23.2	0.800	0.923	0.822	0.022	0.089
13	23.4	0.867	1.003	0.842	0.025	0.042
14	23.4	0.933	1.019	0.846	0.087	0.021
15	23.5	1.000	1.067	0.857	0.143	0.076

Tomado de: Elaboración Propia

Tabla 70

Comparación Kd o estadístico de prueba vs k critico nivel de confianza 95%

K.s estadístico de prueba D	0.185		
	90%	95%	99%
K.s valor critico tablas	0.304	0.338	0.404
K.s valor critico c	0.201	0.219	0.254

Tomado de: Elaboración Propia

Como puede observarse en la tabla de comparación el estadístico de prueba de Kolmogorov – Smirnov es menor que le valor crítico, por lo tanto, se acepta la hipótesis nula y se comprueba que la muestra sigue una distribución normal para el diseño de mezcla usando el método de Curva de la tarántula y desarrollo a la resistencia a los 28 días.

13.2.7. PRUEBA DE NORMALIDAD DE KOLMOGOROV-SMIRNOV DISEÑO DE MEZCLA USANDO METODO DE MÍNIMOS CUADRADOS, RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 28 DÍAS

Tabla 71

Datos prueba de normalidad de Kolmogorov – Smirnov para diseño de mezcla método Mínimos cuadrados 28 días

j	Res. MPa	pi	Zi	P(Zi)	l P(zi)-Pi l	l P(Zi)-P(i-1) l
1	20.1	0.067	-2.238	0.013	0.054	0.013
2	20.8	0.133	-1.106	0.134	0.001	0.068
3	20.8	0.200	-0.967	0.167	0.033	0.033
4	21.0	0.267	-0.621	0.267	0.001	0.067
5	21.1	0.333	-0.574	0.283	0.050	0.016
6	21.2	0.400	-0.390	0.348	0.052	0.015
7	21.2	0.467	-0.251	0.401	0.066	0.001
8	21.4	0.533	0.119	0.547	0.014	0.081
9	21.6	0.600	0.442	0.671	0.071	0.137
10	21.7	0.667	0.511	0.695	0.029	0.095
11	21.8	0.733	0.696	0.757	0.023	0.090
12	21.8	0.800	0.788	0.785	0.015	0.051
13	22.0	0.867	1.066	0.857	0.010	0.057
14	22.0	0.933	1.204	0.886	0.048	0.019
15	22.1	1.000	1.320	0.907	0.093	0.027

Tomado de: Elaboración Propia

Tabla 72

Comparación Kd o estadístico de prueba vs k critico nivel de confianza 95%

K.s estadístico de prueba D	0.137		
	90%	95%	99%
K.s valor critico tablas	0.304	0.338	0.404

Tomado de: Elaboración Propia

Como puede observarse en la tabla de comparación el estadístico de prueba de Kolmogorov – Smirnov es menor que le valor crítico, por lo tanto, se acepta la hipótesis nula y se comprueba que la muestra sigue una distribución normal para el diseño de mezcla usando el método de Mínimos cuadrados y desarrollo a la resistencia a los 28 días.

13.2.8. PRUEBA DE NORMALIDAD DE KOLMOGOROV-SMIRNOV DISEÑO DE MEZCLA USANDO METODO DE SHILSTONE, RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 28 DÍAS

Tabla 73

Datos prueba de normalidad de Kolmogorov – Smirnov para diseño de mezcla método de Shilstone 28 días

j	Res. MPa	pi	Zi	P(Zi)	l P(zi)-Pi l	l P(Zi)-P(i-1) l
1	15.9	0.067	-1.725	0.042	0.024	0.042
2	16.4	0.133	-1.339	0.090	0.043	0.024
3	16.8	0.200	-1.079	0.140	0.060	0.007
4	17.1	0.267	-0.837	0.201	0.065	0.001
5	17.2	0.333	-0.723	0.235	0.098	0.032
6	17.5	0.400	-0.511	0.305	0.095	0.029
7	17.5	0.467	-0.508	0.306	0.161	0.094
8	17.6	0.533	-0.469	0.320	0.214	0.147
9	17.7	0.600	-0.353	0.362	0.238	0.171
10	18.6	0.667	0.296	0.616	0.050	0.016
11	18.9	0.733	0.455	0.675	0.058	0.009
12	19.1	0.800	0.635	0.737	0.063	0.004
13	19.7	0.867	1.090	0.862	0.005	0.062
14	19.9	0.933	1.177	0.880	0.053	0.014
15	21.2	1.000	2.165	0.985	0.015	0.051

Tomado de: Elaboración Propia

Tabla 74

Comparación Kd o estadístico de prueba vs k critico nivel de confianza 95%

K.s estadístico de prueba D	0.238		
	90%	95%	99%
K.s valor critico tablas	0.304	0.338	0.404

Tomado de: Elaboración Propia

Como puede observarse en la tabla de comparación el estadístico de prueba de Kolmogorov – Smirnov es menor que le valor crítico, por lo tanto, se acepta la hipótesis nula y se comprueba que la muestra sigue una distribución normal para el diseño de mezcla usando el método de Shilstone y desarrollo a la resistencia a los 28 días.

13.3. NIVEL DE CONFIABILIDAD DEL MUESTREO

Habiendo definido un nivel de confianza de 0.1 y después de comprobar el comportamiento normal de las muestras para cada uno de los diseños de mezcal con resistencias a los 7 y 28 días debe evaluarse la confiablidad, usando la ecuación:

Ecuación 30.

$$Z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

Los elementos estadísticos hallados experimentalmente deben ser transformados para estandarizarlos como parte de una distribución normal con media muestra 0 desviación estándar de 1 y Z= 1.65 que es el perteneciente a un nivel de confianza del 90%.

De la anterior ecuación debe despejarse el valor de x para de esta forma determina los intervalos en los que debe encontrarse la resistencia a la compresión de cada uno de los diseños de mezcla.

Ecuación 31.

$$x = \mu \pm z \times \sigma$$

En donde:
Z = Pertenece al valor de la abscisa para una distribución normal con un nivel de confiabilidad del 90%, media muestral de 0 y desviación estándar de 1.
x= Valor de abscisa para media muestral y desviación estándar experimental.
μ= Media muestral experimental.
σ= Desviación estándar experimental.

13.3.1. NIVEL DE CONFIABILIDAD NORMAL ENSAYO A LA COMPRESIÓN A LOS 7 DÍAS MÉTODO DE FULLER

Usando la ecuación:

$$x = \mu \pm z \times \sigma$$

Determinamos que:

$$x = 15.427 + 1.65 \times 1.203 = 17.817\ MPa$$

$$x = 15.427 - 1.65 \times 1.203 = 13.038\ MPa$$

De esta manera se puede observar que para el diseño de mezcla usando el método de Fuller con una resistencia a la compresión media de 15.427 MPa a los 7 días y desviación estándar de 1.203 MPa se encuentran los siguientes intervalos llamados límites de confianza izquierdo y derecho.

$$13.038\ MPa < resistencia\ a\ la\ compresión\ a\ los\ 7\ días < 17.817\ MPa$$

Observando la gráfica de distribución normal y los límites de confianza LCD y LCI podemos decir que el 100% de los datos se encuentran dentro del intervalo, superando la confiabilidad prevista.

13.3.3. NIVEL DE CONFIABILIDAD NORMAL ENSAYO A LA COMPRESIÓN A LOS 7 DÍAS MÉTODO DE CURVA DE LA TARÁNTULA

Usando la ecuación:

$$x = \mu \pm z \times \sigma$$

Determinamos que:

$$x = 12.967 + 1.65 \times 0.480 = 13.759\ MPa$$

$$x = 12.967 - 1.65 \times 0.480 = 12.176\ MPa$$

De esta manera se puede observar que para el diseño de mezcla usando el método de Fuller con una resistencia a la compresión media de 12.967 MPa a los 7 días y desviación estándar de 0.480 MPa se encuentran los siguientes intervalos llamados límites de confianza izquierdo y derecho.

$$12.176\ MPa < resistencia\ a\ la\ compresión\ a\ los\ 7\ días < 13.759\ MPa$$

Observando la gráfica de distribución normal y los límites de confianza LCD y LCI podemos decir que los datos que se encuentran dentro del intervalo, superan la confiabilidad prevista del 90%.

13.3.3. NIVEL DE CONFIABILIDAD NORMAL ENSAYO A LA COMPRESIÓN A LOS 7 DÍAS MÉTODO DE MÍNIMOS CUADRADOS

Usando la ecuación:

$$x = \mu \pm z \times \sigma$$

Determinamos que:

$$x = 14.288 + 1.65 \times 0.612 = 15.298\ MPa$$

$$x = 14.288 - 1.65 \times 0.612 = 13.278\ MPa$$

De esta manera se puede observar que para el diseño de mezcla usando el método de Fuller con una resistencia a la compresión media de 14.288 MPa a los 7 días y desviación estándar de 0.612 MPa se encuentran los siguientes intervalos llamados límites de confianza izquierdo y derecho.

$$13.278\ MPa < resistencia\ a\ la\ compresión\ a\ los\ 7\ días < 15.278\ MPa$$

Observando la gráfica de distribución normal y los límites de confianza LCD y LCI podemos decir que los datos que se encuentran dentro del intervalo, superan la confiabilidad prevista del 90% llegando casi al 99%.

13.3.4. NIVEL DE CONFIABILIDAD NORMAL ENSAYO A LA COMPRESIÓN A LOS 7 DÍAS MÉTODO DE MÍNIMOS SHILSTONE

Usando la ecuación:

$$x = \mu \pm z \times \sigma$$

Determinamos que:

$$x = 11.937 + 1.65 \times 1.091 = 13.738\ MPa$$

$$x = 11.937 + 1.65 \times 1.091 = 10.136\ MPa$$

De esta manera se puede observar que para el diseño de mezcla usando el método de Fuller con una resistencia a la compresión media de 11.937 MPa a los 7 días y desviación estándar de 1.091 MPa se encuentran los siguientes intervalos llamados límites de confianza izquierdo y derecho.

$$10.136\ MPa < resistencia\ a\ la\ compresión\ a\ los\ 7\ días < 13.738\ MPa$$

Observando la gráfica de distribución normal y los límites de confianza LCD y LCI podemos decir que los datos que se encuentran dentro del intervalo, superan la confiabilidad prevista del 90%.

13.3.5. NIVEL DE CONFIABILIDAD NORMAL ENSAYO A LA COMPRESIÓN A LOS 28 DÍAS MÉTODO DE FULLER

Usando la ecuación:

$$x = \mu \pm z \times \sigma$$

Determinamos que:

$$x = 23.536 + 1.65 \times 0.919 = 25.053\ MPa$$

$$x = 23.536 - 1.65 \times 0.919 = 22.020\ MPa$$

De esta manera se puede observar que para el diseño de mezcla usando el método de Fuller con una resistencia a la compresión media de 23.536 MPa a los 28 días y desviación estándar de 0.919 MPa se encuentran los siguientes intervalos llamados límites de confianza izquierdo y derecho.

$$22.020\ MPa < resistencia\ a\ la\ compresión\ a\ los\ 28\ días < 25.053\ MPa$$

Observando la gráfica de distribución normal y los límites de confianza LCD y LCI podemos decir que los datos que se encuentran dentro del intervalo, superan la confiabilidad prevista del 90%.

13.3.6. NIVEL DE CONFIABILIDAD NORMAL ENSAYO A LA COMPRESIÓN A LOS 28 DÍAS MÉTODO DE CURVA DE LA TARÁNTULA

Usando la ecuación:

$$x = \mu \pm z \times \sigma$$

Determinamos que:

$$x = 21.751 + 1.65 \times 1.595 = 24.383\ MPa$$

$$x = 21.751 - 1.65 \times 1.595 = 19.119\ MPa$$

De esta manera se puede observar que para el diseño de mezcla usando el método de Fuller con una resistencia a la compresión media de 21.751 MPa a los 28 días y desviación estándar de 1.595 MPa se encuentran los siguientes intervalos llamados límites de confianza izquierdo y derecho.

$$19.119\ MPa < resistencia\ a\ la\ compresión\ a\ los\ 7\ días < 24.383\ MPa$$

Observando la gráfica de distribución normal y los límites de confianza LCD y LCI podemos decir que los datos que se encuentran dentro del intervalo, superan la confiabilidad prevista del 90%.

13.3.7. NIVEL DE CONFIABILIDAD NORMAL ENSAYO A LA COMPRESIÓN A LOS 7 DÍAS MÉTODO DE MÍNIMOS CUADRADOS

Usando la ecuación:

$$x = \mu \pm z \times \sigma$$

Determinamos que:

$$x = 21.376 + 1.65 \times 0.551 = 22.285\ MPa$$

$$x = 21.376 - 1.65 \times 0.551 = 20.467\ MPa$$

De esta manera se puede observar que para el diseño de mezcla usando el método de Fuller con una resistencia a la compresión media de 21.376MPa a los 28 días y desviación estándar de 0.551 MPa se encuentran los siguientes intervalos llamados límites de confianza izquierdo y derecho.

$$20.467\ MPa < resistencia\ a\ la\ compresión\ a\ los\ 7\ días < 22.285\ MPa$$

Observando la gráfica de distribución normal y los límites de confianza LCD y LCI podemos decir que los datos que se encuentran dentro del intervalo, superan la confiabilidad prevista del 90%.

13.3.8. NIVEL DE CONFIABILIDAD NORMAL ENSAYO A LA COMPRESIÓN A LOS 7 DÍAS MÉTODO DE MÍNIMOS SHILSTONE

Usando la ecuación:

$$x = \mu \pm z \times \sigma$$

Determinamos que:

$$x = 18.076 + 1.65 \times 1.459 = 20.483\ MPa$$
$$x = 18.076 - 1.65 \times 1.459 = 15.699\ MPa$$

De esta manera se puede observar que para el diseño de mezcla usando el método de Fuller con una resistencia a la compresión media de 18.076 MPa a los 28 días y desviación estándar de 1.459 MPa se encuentran los siguientes intervalos llamados límites de confianza izquierdo y derecho.

$$15.699\ MPa < resistencia\ a\ la\ compresión\ a\ los\ 7\ días < 20.483\ MPa$$

Observando la gráfica de distribución normal y los límites de confianza LCD y LCI podemos decir que los datos que se encuentran dentro del intervalo, superan la confiabilidad prevista del 90%.

13.4. PRUEBA DE MEDIAS Y VARIANZAS, ANÁLISIS ANOVA

Después de verificar la normalidad de la muestra, se procede a evaluar la diferencia entre las medias de los datos obtenidos para los diseños de mezcal a los 7 días y a los 28 días, con el fin de determinar si son estadísticamente significativas y no se deben simplemente al azar, también que existe una relación causal que la subyace.

Para esto determinamos el problema y generamos la hipótesis nula y la hipótesis alternativa.

En el experimento se utilizaron 4 diferentes diseños de mezcla de concreto, obteniendo por cada una 15 muestras, midiendo la resistencia a la compresión. Se desea saber si el promedio de resistencias es igual para cada diseño de mezcla o no.

Se generan las hipótesis

$$H_0 = las\ medias\ son\ iguales$$

$$H_1 = por\ lo\ menos\ una\ media\ \ es\ diferente$$

El análisis ANOVA toma siempre como hipótesis nula el que las medias son iguales, si al final del análisis el estadístico de prueba F es mayor que el valor crítico, se rechaza la hipótesis nula, de lo contrario se acepta.

13.4.1. ANÁLISIS ANOVA DISEÑOS DE MEZCLA DE FULLER, CURVA DE LA TARÁNTULA, MÍNIMOS CUADRADOS Y SHILSTONE A LOS 7 DÍAS

Tabla 75
Resistencia en MPa a los 7 días de las 15 muestras realizadas

DIAS		7 DIAS			
	METODO	**F**	**T**	**M**	**S**
f´c	**1**	13.60	12.40	13.27	9.84
	2	13.93	12.44	13.37	10.98
	3	14.62	12.50	13.39	10.99
	4	14.81	12.52	14.01	11.00
	5	14.96	12.63	14.01	11.06
	6	15.34	12.68	14.23	11.46
	7	15.47	12.73	14.27	11.60
	8	16.12	12.87	14.30	11.71
	9	16.16	13.03	14.39	12.16
	10	16.22	13.09	14.48	12.53
	11	16.28	13.18	14.48	12.63
	12	13.39	13.42	14.86	12.77
	13	16.59	13.48	14.91	13.31
	14	16.91	13.52	15.15	13.37
	15	17.13	14.02	15.22	13.65

Tomado de: Elaboración Propia

Tabla 76
valores estadísticos para análisis ANOVA diseños de mezcla a los 7 días

METODO	F	T	M	S
Suma (Xi)	231.53	194.51	214.32	179.06
Media	15.44	12.97	14.29	11.94
Suma Total (X..)		819.42		
ni	15	15	15	15
N		60		
k		4		
SC trat		104.90		
SC total		149.84		
SC error		44.94		

Tomado de: Elaboración Propia

Tabla 77
ANOVA para estadístico de prueba F

Tabla ANOVA				
Fuente de Variación	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado medio	F
Entre las muestras	104.90	3	34.97	43.58
Dentro de las muestras	44.94	56	0.80	
Total	149.84	59		

Valor crítico	2.769430932
P - Valor	1.15627E-14

Tomado de: Elaboración Propia

Como se comentó antes, el análisis ANOVA compara el estadístico de prueba F con el valor critico obtenido y de esta manera aceptar o rechazar la hipótesis nula. En este casi observamos que el estadístico de prueba F, 43.58 es mayor al valor critico F 2.76, por lo que la hipótesis nula es rechazada y se afirma con un 95% de seguridad que hay diferencia ente el promedio de las resistencias generadas por cada diseño de mezcla. (Fuller, Tarántula, Mínimos cuadrados y Shilstone).

Para determinar si existe igualdad o diferencia entre cada uno de las medias de cada diseño de mezcla se complementa el análisis ANOVA con el método de Tukey. Este nos permite realizar una comparativa entre medias muestrales y el valor critico T, pudiendo encontrar si existen diferencias significativas o no significativas entre cada método, si existen diferencias significativas, los métodos no serán iguales, de lo contrario lo serán.

Donde

$$T_\alpha = q_\alpha\,(k.N - K) \times \sqrt{CM_i/n_i}$$

K = número de muestras a comparara
Ni = cantidad de elementos de cada muestra
Cme = cuadrado medio del error
Qa = valor critico de tablas

Tabla 78
de valores método de Tukey

método de Tukey	
K	4
N-k	56
CMe	0.80
ni	15
q(k,n-k)	3.76
T	0.870

Tomado de: Elaboración Propia

Tabla 79
diferencias significativas o no método de Tukey

Diferencia poblacional	Diferencia muestral	Diferencia
F-T	2.46753247	Significativa
F-Mc	1.14676173	Significativa
F-S	3.49800526	Significativa
T-Mc	1.32077073	Significativa
T-S	1.0304728	Significativa
Mc-S	2.35124353	Significativa

Tomado de: Elaboración Propia

Como puede observarse en la tabla de diferencias significativas, el valor de las diferencias de medias muestrales es mayor que el valor critico T, por lo que la diferencia es significativa y los métodos tienen resistencias medias diferentes.

13.4.2. ANÁLISIS ANOVA DISEÑOS DE MEZCLA DE FULLER, CURVA DE LA TARÁNTULA, MÍNIMOS CUADRADOS Y SHILSTONE A LOS 28 DÍAS

Tabla 80
Resistencia en MPa a los 28 días de las 15 muestras realizadas

Diseño de mezclas (Resistencia en MPa)

DIAS		28 DIAS			
METODO		**F**	**T**	**M**	**S**
	1	21.08	17.23	20.14	15.86
	2	22.59	20.38	20.77	16.39
	3	22.65	21.00	20.84	16.75
	4	22.74	21.11	21.03	17.08
	5	23.46	21.25	21.06	17.24
	6	23.67	21.43	21.16	17.53
	7	23.76	21.57	21.24	17.54
	8	23.80	21.89	21.44	17.59
f´c	**9**	23.92	21.98	21.62	17.75
	10	23.96	22.07	21.66	18.64
	11	24.12	22.97	21.76	18.86
	12	24.12	23.22	21.81	19.11
	13	24.24	23.35	21.96	19.73
	14	24.27	23.38	22.04	19.85
	15	24.65	23.45	22.10	21.21

Tomado de: Elaboración Propia

Tabla 81
valores estadísticos para análisis ANOVA diseños de mezcla a los 28 días

METODO	F	T	M	S
Suma (Xi)	353.04	326.27	320.64	271.14
Media	23.54	21.75	21.38	18.08
Suma Total (X..)		1271.09		
ni	15	15	15	15
N		60		
k		4		
SC trat		233.27		
Sc total		314.78		
SC error		81.50		

Tomado de: Elaboración Propia

Tabla 82
ANOVA para estadístico de prueba F

Tabla ANOVA

Fuente de Variación	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado medio	F
Entre las muestras	233.27	3	77.76	53.43
Dentro de las muestras	81.50	56	1.46	
Total	314.78	59		

Valor crítico	2.76943093
P - Valor	1.9403E-16

Tomado de: Elaboración Propia

Como se comentó antes, el análisis ANOVA compara el estadístico de prueba F con el valor critico obtenido y de esta manera aceptar o rechazar la hipótesis nula. En este casi observamos que el estadístico de prueba F, 56.43 es mayor al valor critico F 2.76, por lo que la hipótesis nula es rechazada y se afirma con un 95% de seguridad que hay diferencia ente el promedio de las resistencias generadas por cada diseño de mezcla. (Fuller, Tarántula, Mínimos cuadrados y Shilstone).

Para determinar si existe igualdad o diferencia entre cada uno de las medias de cada diseño de mezcla se complementa el análisis ANOVA con el método de Tukey. Este nos permite realizar una comparativa entre medias muestrales y el valor critico T, pudiendo encontrar si existen diferencias significativas o no significativas entre cada método, si existen diferencias significativas, los métodos no serán iguales, de lo contrario lo serán.

Donde

$$T_\alpha = q_\alpha\,(k.N - K) \times \sqrt{CM_i/n_i}$$

K = número de muestras a comparara
Ni = cantidad de elementos de cada muestra
Cme = cuadrado medio del error
Qa = valor critico de tablas

Tabla 83
de valores método de Tukey

método de Tukey	
K	4
N-k	56
CMe	1.46
ni	15
q(k,n-k)	3.76
T	1.171

Tomado de: Elaboración Propia

Tabla 84
diferencias significativas o no método de Tukey

diferencia poblacional	Diferencia muestral	Diferencia
F-T	1.78510313	Significativa
F-Mc	2.16028351	Significativa
F-S	5.46031322	Significativa
T-Mc	0.37518038	No significativa
T-S	3.67521008	Significativa
Mc-S	3.30002971	Significativa

Tomado de: Elaboración Propia

Como puede observarse en la tabla de diferencias significativas, el valor de las diferencias de medias muestrales es mayor que el valor critico T para casi todos los casos. Pero en el diseño de mezcla de la curva de la tarántula y mínimos cuadrados no, por lo que puede decirse que los dos métodos generan resistencias medias iguales.

ANÁLSIS DE RESULTADOS

Después de haber realizado el análisis estadístico de las 120 muestras pertenecientes a los cuatro métodos de diseño mezcla, verificando su normalidad, confianza, análisis de medias y varianzas se procede a realizar el análisis de resultados con el objetivo de verificar que los requisitos de resistencia y calidad se encuentren presentes, para esto continuaremos usando los parámetros de la Norma Técnica colombiana NTC – 2275

13.5. CURVA DE RESISTENCIA A LA COMPRESION (fc) VS TIEMPO (t)

El objetivo de esta grafica es identificar el comportamiento de la resistencia a la compresión en periodos de tiempo de 7, 14 y 28 días, comparando las resistencias promedio desarrolladas por cada método de los diseños de mezcla, respecto a la resistencia a la compresión típica en un diseño de mezcla de 21 MPa, cabe resaltar que las muestras tomadas para cada uno de los diseños de mezcla (Mínimos cuadrados, curva de la tarántula, mínimos cuadrados, y Shilstone) fueron fallados a los 7 y 28 días, por tanto los datos usados para la resistencia promedio a los 14 días se obtuvieron sabiendo que en promedio el 90% de la resistencia se obtiene en este periodo de tiempo.

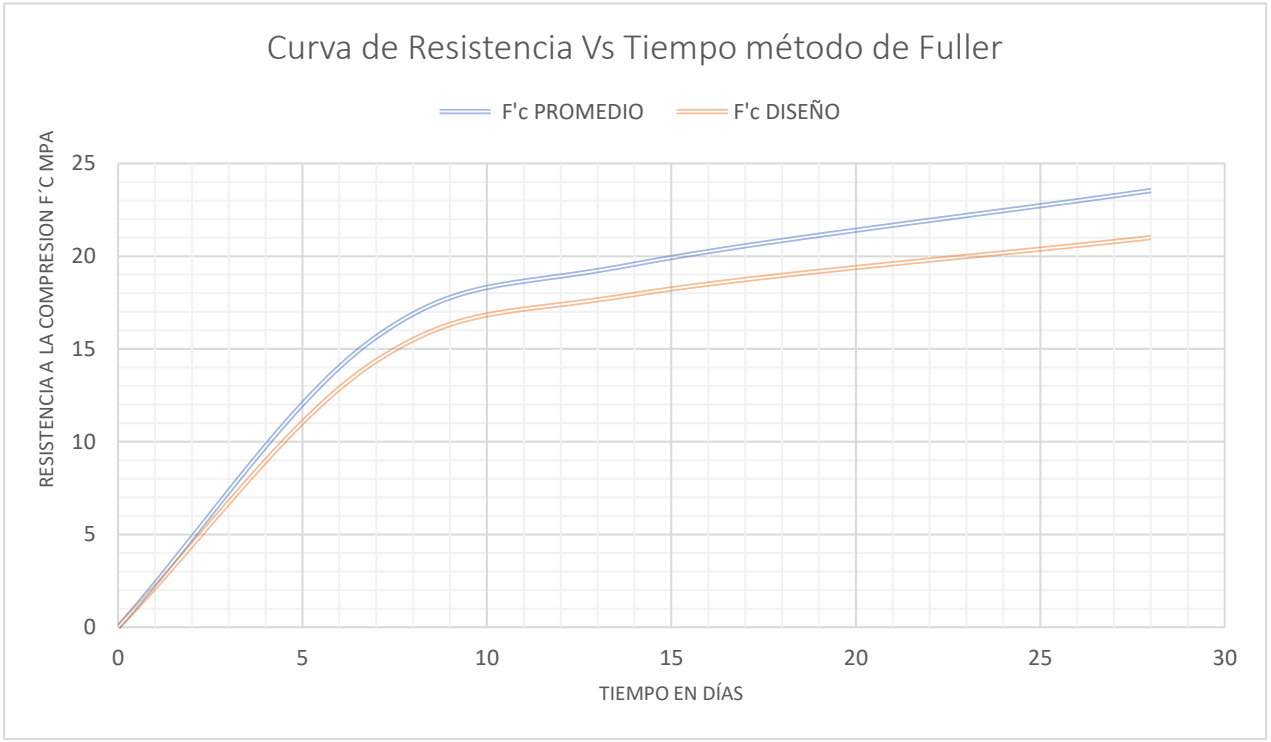
13.5.1. RESISTENCIA VS TIEMPO MÉTODO DE FULLER

Tabla 85
resistencia promedio a la compresión a diferentes edades diseño de mezcla

RESISTENCIA A LA COMPRESION VS TIEMPO METODO FULLER			
Periodo en Días	**F´c Promedio (MPa)**	**F´c Diseño (MPa)**	**% de resistencia desarrollada respecto a f´c diseño**
0	0	0	0
7	15.65	14.36	109%
14	19.57	17.94	109%
28	23.54	21.00	112%

Tomado de: Elaboración Propia

Ilustración 77 Gráfico desarrollo de resistencia método de Fuller



Tomado de: Elaboración Propia

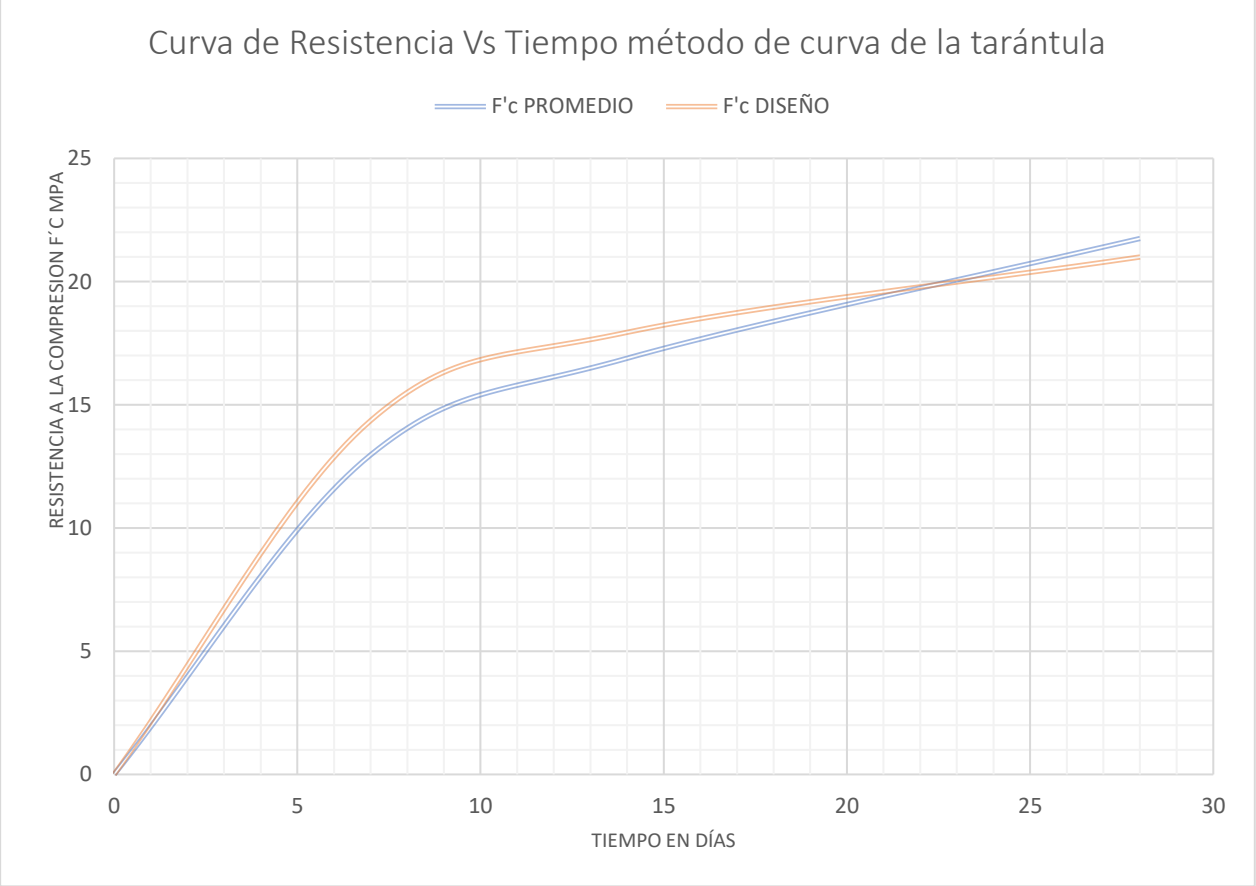
13.5.2. RESISTENCIA VS TIEMPO MÉTODO DE CURVA DE LA TARANTULA

Tabla 86
resistencia promedio a la compresión a diferentes edades diseño de mezcla método de la curva de la tarántula (promedio de 15 muestras de ensayo de resistencia a la compresión)

RESISTENCIA A LA COMPRESION VS TIEMPO METODO CURVA TARANTULA			
Periodo en Días	**F´c Promedio MPa**	**F´c Diseño MPa**	**% de resistencia desarrollada respecto a f´c diseño**
0	0	0	0
7	12.97	14.36	90%
14	16.89	17.94	94%
28	21.75	21.00	104%

Tomado de: Elaboración Propia

Ilustración 78 Gráfico desarrollo de resistencia método de Curva de la tarántula



Tomado de: Elaboración Propia

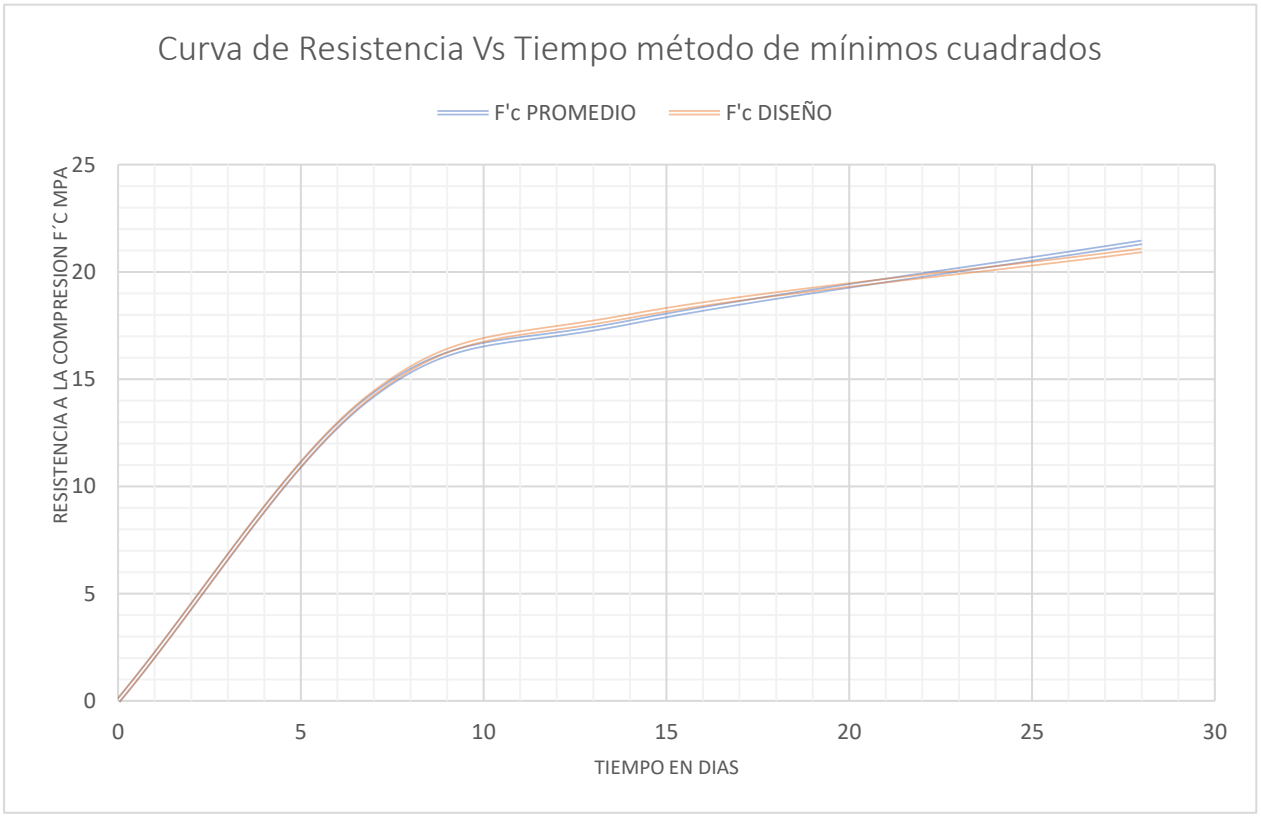
13.5.3. RESISTENCIA VS TIEMPO MÉTODO DE MÍNIMOS CUADRADOS

Tabla 87
resistencia promedio a la compresión a diferentes edades diseño de mezcla método de Mínimos cuadrados (promedio de 15 muestras de ensayo de resistencia a la compresión)

RESISTENCIA A LA COMPRESION VS TIEMPO METODO MINIMOS CUADRADOS			
Periodo en Días	**F´c Promedio MPa**	**F´c Diseño MPa**	**% de resistencia desarrollada respecto a f´c diseño**
0	0	0	0
7	14.29	14.36	100%
14	17.65	17.94	98%
28	21.38	21.00	102%

Tomado de: Elaboración Propia

Ilustración 79 Gráfico desarrollo de resistencia método de Mínimos cuadrados



Tomado de: Elaboración Propia

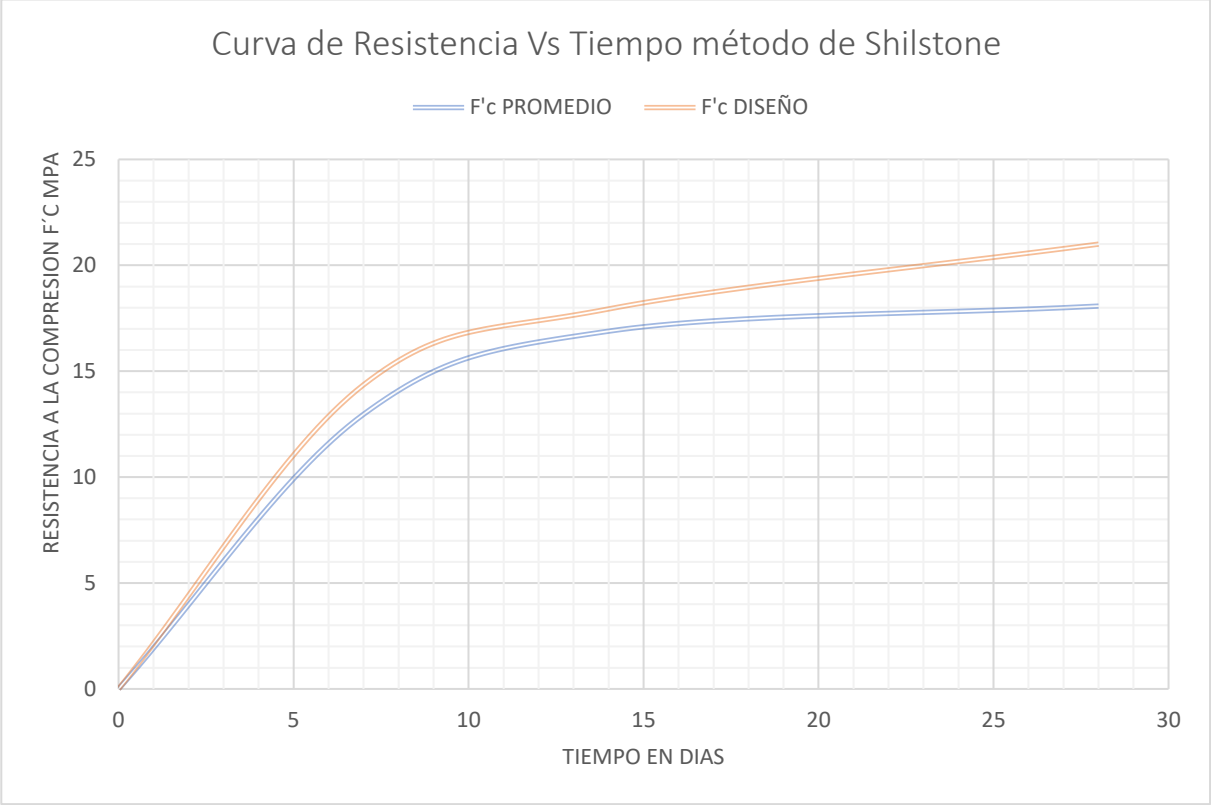
13.5.4. RESISTENCIA VS TIEMPO MÉTODO DE SHILSTONE

Tabla 88
resistencia promedio a la compresión a diferentes edades diseño de mezcla método de Shilstone (promedio de 15 muestras de ensayo de resistencia a la compresión)

RESISTENCIA A LA COMPRESION VS TIEMPO METODO SHILSTONE			
Periodo en Días	**F´c Promedio MPa**	**F´c Diseño MPa**	**% de resistencia desarrollada respecto a f´c diseño**
0	0	0	0
7	12.97	14.36	90%
14	16.89	17.94	94%
28	18.08	21.00	86%

Tomado de: Elaboración Propia

Ilustración 80 Gráfico desarrollo de resistencia método de Shilstone



Tomado de: Elaboración Propia

13.5.5. RESISTENCIA VS TIEMPO DISEÑOS DE MEZCLA DE LOS 4 METODOS, FULLER, CURVA DE LA TARÁNTULA, MÍNIMOS CUADRADOS Y SHILSTONE.

Tabla 89

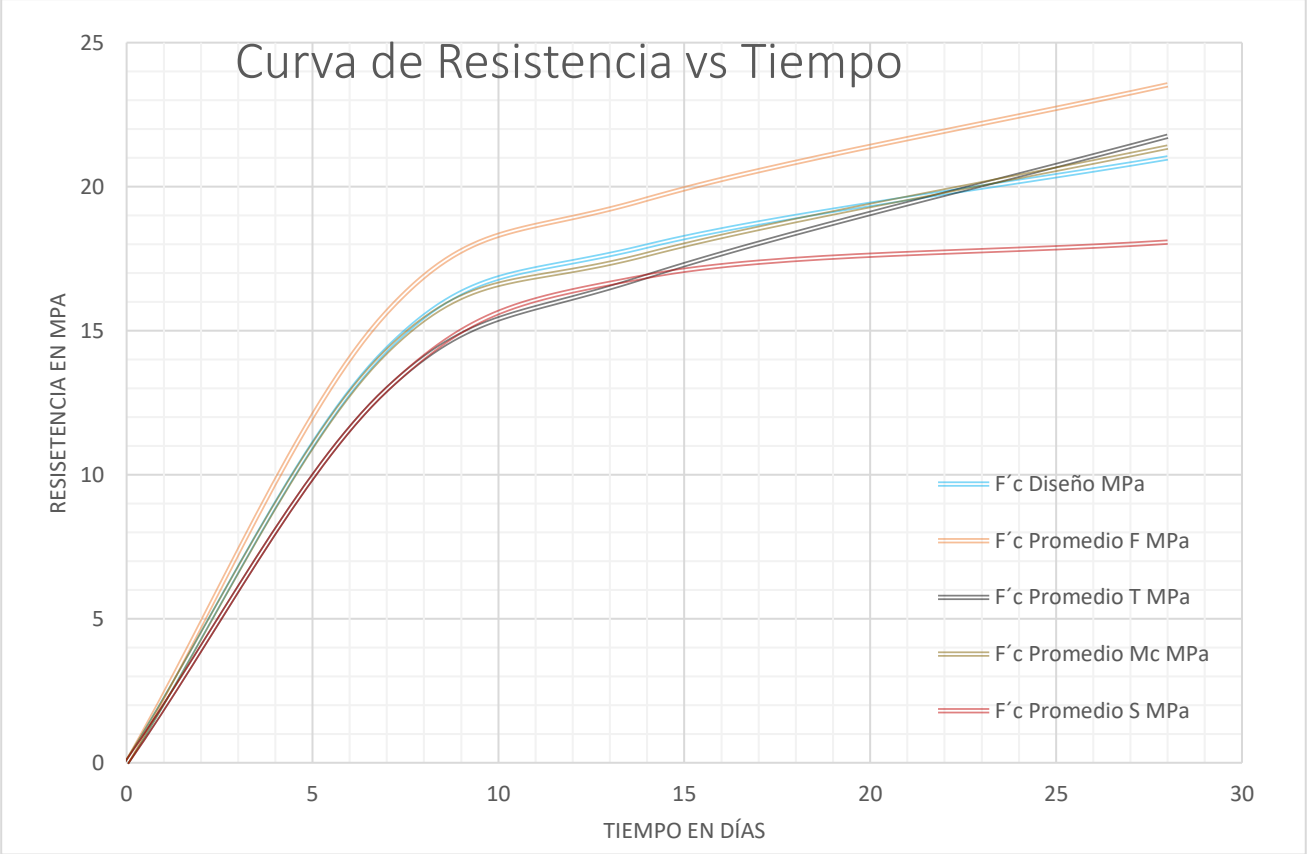
resistencia promedio a la compresión a diferentes edades diseños de mezcla, Fuller, curva de la tarántula Mínimos cuadrados y Shilstone, (promedio de 15 muestras de ensayo de resistencia a la compresión)

RESISTENCIA A LA COMPRESION VS TIEMPO

Periodo en Días	**F´c Diseño MPa**	**F´c Promedio F MPa**	**F´c Promedio T MPa**	**F´c Promedio Mc MPa**	**F´c Promedio S MPa**
0	0	0	0	0	0
7	14.36	15.65	12.97	14.29	12.97
14	17.94	19.57	16.89	17.65	16.89
28	21.00	23.54	21.75	21.38	18.08

Tomado de: Elaboración Propia

Ilustración 81 Gráfico desarrollo de resistencia diseños de mezcla, Fuller, curva de la tarántula



Tomado de: Elaboración Propia

Observando las gráficas de resistencia vs tiempo del apartado anterior, puede interpretarse que tres de los 4 diseños de mezcla usados, alcanzaron o sobrepasaron la resistencia a la compresión a los 28 días planteada en el presente trabajo, igual a 21 MPa también que el método de Shilstone nunca alcanzo las resistencias esperadas para los periodos de tiempo de 7, 14 y 28 días, alcanzando solo el 86% de la resistencia requerida, el método de la curva de la tarántula, si bien, no alcanzo las resistencias iniciales para los periodos de 7 y 14 días, alcanzo un 104% de la resistencia final a los 28 días, el método de mínimos cuadrados fue el que más semejanza tuvo con las resistencias esperadas a los 7, 14 y 28 días para finalmente alcanzar el 102% de la resistencia esperada a los 28 días, el diseño de mezcla usando método de Fuller fue aquel que mayores resistencias obtuvo en los diferentes periodos de tiempo llegando a alcanzar el 112% de la resistencia requerida.

13.6. CONTROL DE CALIDAD DEL CONCRETO

La NTC 2275 a través de dos tablas nos indica la variabilidad esperada en los ensayos de resistencia a la compresión en diferentes proyectos sujetos a diferentes grados de control (NTC 2275, 1997, pág. 11)

Tabla 90
Normas para el control del concreto según desviación estándar.

	Variación total				
clase de operación	Desviación estándar para diferentes clases de control, MPa (psi)				
	excelente	muy bueno	bueno	aceptable	pobre
Ensayo de construcciones en general	por debajo de 2,5 (357)	de 2,5 a 3,5 (357 a 500)	de 3,5 a 4,0 (500 a 571)	de 4,0 a 5,0 (571 a 714)	sobre 5,0 (714)
Mezclas de ensayos de laboratorio	por debajo de 1,5 (214)	de 1,5 a 1,7 (214 a 243)	de 1,7 a 2,0 (243 a 286)	de 2,0 a 2,5 (286 a 357)	sobre 2,5 (357)

Tomado de Norma Técnica Colombiana NTC – 2275. Procedimiento recomendado para la evaluación de los resultados de los ensayos de resistencia del concreto.

Tabla 91
Normas para el control del concreto según coeficiente de variación.

Variación dentro del ensayo					
clase de operación	Coeficiente de variación para diferentes clases de control, en %				
	excelente	muy bueno	bueno	aceptable	pobre
Ensayo de construcciones en general	por debajo de 3,0	de 3,0 a 4,0	de 4,0 a 5,0	de 5,0 a 6,0	por encima de 6,0
Mezclas de ensayos de laboratorio	por debajo de 2,0)	de 2,0 a 3,0	de 3,0 a 4,0	de 4,0 a 5,0	por encima de 5,0

Tomado de Norma Técnica Colombiana NTC – 2275. Procedimiento recomendado para la evaluación de los resultados de los ensayos de resistencia del concreto.

Las cuatro tablas siguientes muestran la desviación estándar y variabilidad de cada uno de los diseños de mezcla usados y resistencia a la compresión a los 28 días.

Tabla 92
Variabilidad y desviación estándar a los 28 días para diseño de mezcla método de Fuller

diseño de mezcla Método de Fuller			desviación estándar ensayo de construcciones en general	coeficiente de variación construcciones en general
	valor	variabilidad en % respecto a la media	excelente	muy bueno
Variabilidad	0.039	3.9%	por debajo de 2,5 (357)	de 3.0 a4.0
Desviación estándar	0.919			

Tomado de: Elaboración Propia

Tabla 93
Variabilidad y desviación estándar a los 28 días para diseño de mezcla método de Curva de la tarántula

diseño de mezcla Método de la curva de la Tarántula			desviación estándar ensayo de construcciones en general	coeficiente de variación construcciones en general
	valor	variabilidad en % respecto a la media	excelente	pobre
Variabilidad	0.073	7.3%	por debajo de 2,5 (357)	por encima de 6.0
Desviación estándar	1.595			

Tomado de: Elaboración Propia

Tabla 94
Variabilidad y desviación estándar a los 28 días para diseño de mezcla método de Mínimos cuadrados

diseño de mezcla Método de Mínimos cuadrados			desviación estándar ensayo de construcciones en general	coeficiente de variación construcciones en general
	valor	variabilidad en % respecto a la media	excelente	excelente
Variabilidad	0.026	2.6%	por debajo de 2,5 (357)	por debajo de 3.0
Desviación estándar	0.551			

Tomado de: Elaboración Propia

Tabla 95
Variabilidad y desviación estándar a los 28 días para diseño de mezcla método de Shilstone

diseño de mezcla Método de Shilstone			desviación estándar ensayo de construcciones en general	coeficiente de variación construcciones en general
	valor	variabilidad en % respecto a la media	excelente	pobre
Variabilidad	0.081	8.1%	por debajo de 2,5 (357)	por encima de 6.0
Desviación estándar	1.459			

Tomado de: Elaboración Propia

De las anteriores tablas puede interpretarse que la desviación estándar es la medida adecuada de dispersión que debe utilizarse para los ensayos realizados, que a su vez buscan simular las condiciones de un proyecto de construcción tales como, humedad y absorción de los agregados.

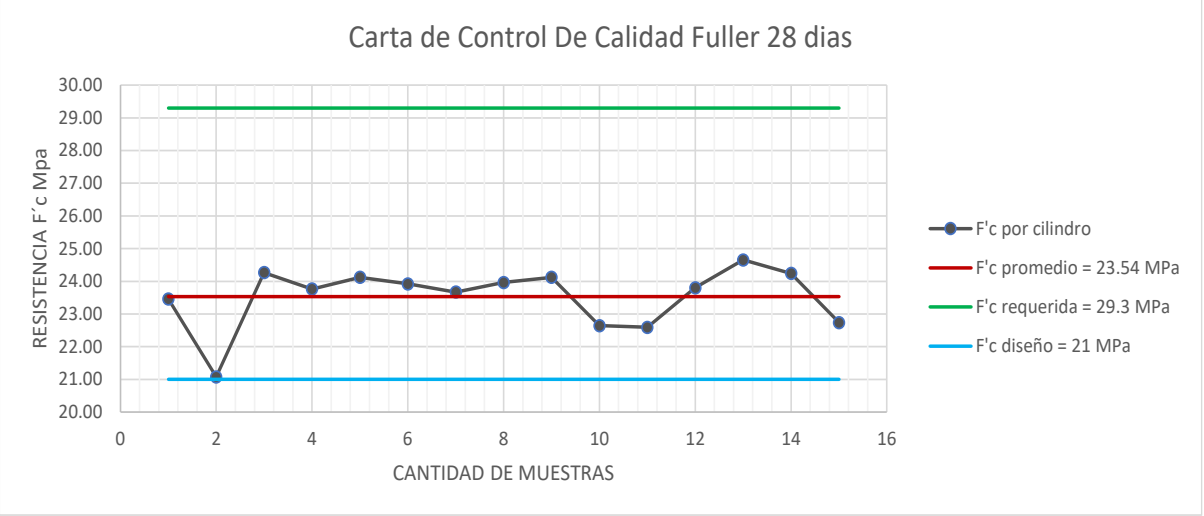
13.7. CARTAS DE CONTROL DE CALIDAD DEL CONCRETO

La NTC 2275 nos dice que, para cualquier trabajo en particular, debe hacerse un número suficiente de ensayos con el fin de asegurar la representación exacta de las variaciones del concreto (NTC 2275, 1997, pág. 21), y una de los elementos que permiten la visualización grafica de la variación de resistencia a la compresión del concreto a los 28 días, son las cartas de control de calidad para el concreto, estas permiten además identificar diseños de mezcla que no cumplen con la resistencia de diseño y aquellas que están por encima, posibilitando la optimización de materiales que mejor desarrollo de resistencia a la compresión se acerquen a la resistencia de diseño.

Para los diferentes métodos de diseño de mezcla usados en el presente trabajo se realizaron cartas de control de calidad del concreto, usando los resultados de resistencia obtenidos en cada una de las 15 muestras falladas, ay se compararán contra la resistencia de diseño igual a 21 MPa, la resistencia requerida, 29.3 MPa y el promedio de las resistencias de cada método.

13.7.1. CARTA DE CONTROL DE CALIDAD PARA DISEÑO DE MEZCLA USANDO MÉTODO DE FULLER

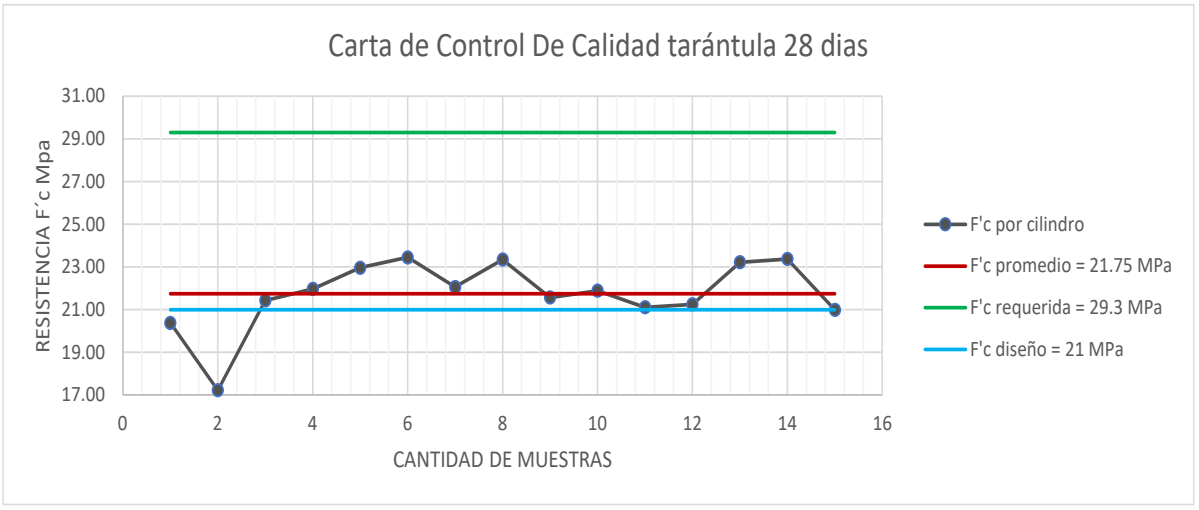
Ilustración 82 Carta de control de calidad para diseño de mezcla usando método de Fuller



Tomado de: Elaboración Propia

13.7.2. CARTA DE CONTROL DE CALIDAD PARA DISEÑO DE MEZCLA USANDO MÉTODO DE FULLER

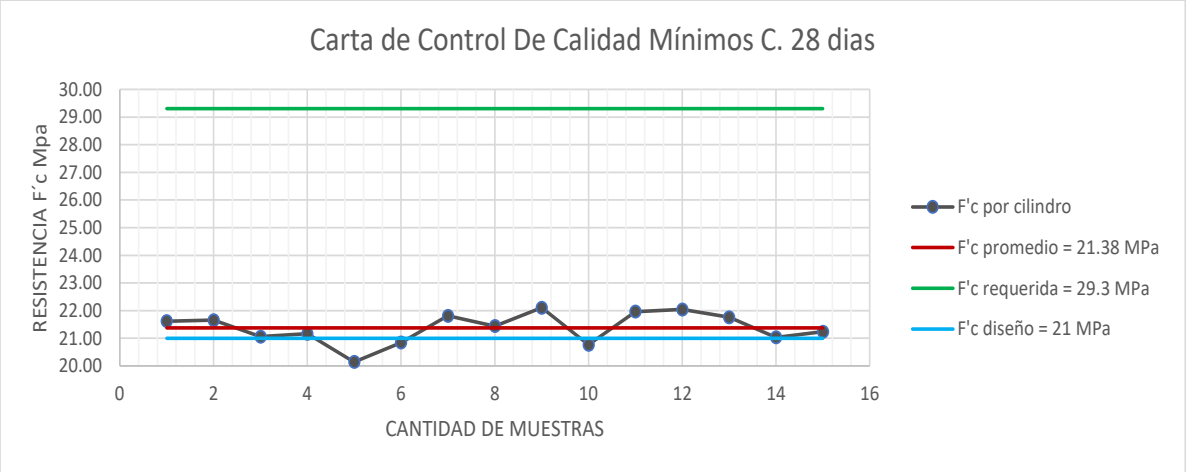
Ilustración 83 Carta de control de calidad para diseño de mezcla usando método de Fuller



Tomado de: Elaboración Propia

13.7.3. CARTA DE CONTROL DE CALIDAD PARA DISEÑO DE MEZCLA USANDO MÉTODO DE FULLER

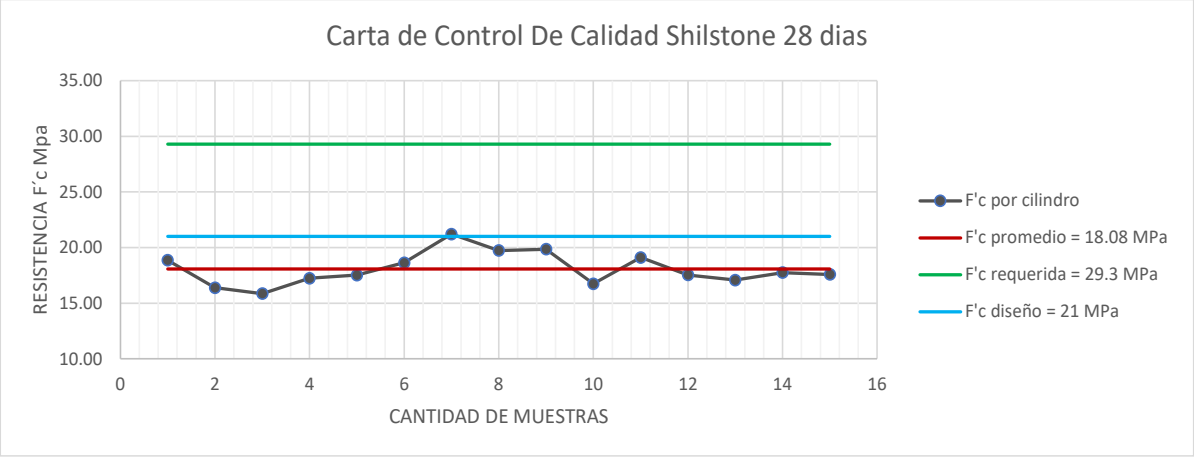
Ilustración 84 Carta de control de calidad para diseño de mezcla usando método de Fuller



Tomado de: Elaboración Propia

13.7.4. CARTA DE CONTROL DE CALIDAD PARA DISEÑO DE MEZCLA USANDO MÉTODO DE FULLER

Ilustración 85 Carta de control de calidad para diseño de mezcla usando método de Fuller



Tomado de: Elaboración Propia

La NTC 2275 dicta que el número de ensayos con resistencias inferiores a la deseada es más importante en el cálculo de la capacidad de carga de las estructuras de concreto que la resistencia promedio obtenida, pero la resistencia promedio del concreto debe ser superior a la resistencia de diseño. (NTC 2275, 1997, pág. 13)

Además, la NTC 3318 (ASTM C94) utiliza un criterio similar, para el concreto en estructuras diseñadas mediante el método de resistencia última, se recomienda que no más del 10 % de los ensayos de resistencia, tengan valores inferiores a la resistencia especificada f'c. (NTC 2275, 1997, pág. 17)

Teniendo en cuenta las disposiciones de la norma anteriormente descritas y las gráficas de las cartas de calidad de concreto observamos que, las muestras obtenidas de los métodos de Fuller, mínimos cuadrados y curva de la tarántula alcanzaron una resistencia media mayor a los 21 MPa, sin embargo, el método de Shilstone no.

No más del 10% (2 muestras) de las resistencias a los 28 días individuales de los métodos de Fuller, Mínimos cuadrados y curva de la tarántula fueron inferiores a la resistencia de diseño f'c 21MPa, caso contrario a lo ocurrido con el método de Shilstone
De lo anterior se puede deducir que los tres primeros métodos son confiables en su diseño, indicando un control adecuado en los factores que influyen en el desarrollo de la resistencia. En el caso del diseño de mezcla usando el método de Shilstone, puede no haberse llevado un control adecuado de estos factores.

13.8. ANALISIS DE RESISTENCIA VS TRABAJABILIDAD.

Una vez obtenidos los valores de los ensayos de Resistencia a la compresión a los 28 días de todas las muestras y los resultados de las pruebas de asentamiento de cada uno de los métodos se procede como último paso a comparar la resistencia a la compresión con respecto al asentamiento requerido por cada uno de los métodos.

Por último, se toman las lecturas de asentamiento desde la parte superior del molde (altura máxima de 305 mm), hasta el centro de la parte superior de la muestra

Ilustración 86 Implementos utilizados en prueba de trabajabilidad



Tomado de: Elaboración Propia

Ilustración 87 Ilustración 87 Colocación de varilla y medida de asentamiento



Tomado de: Elaboración Propia

13.8.1. RESULTADOS OBTENIDOS

Luego de realizar los ensayos de asentamiento al diseño de mezcla de concreto normal se obtuvieron las siguientes lecturas:

Tabla 96
Resultados ensayo de asentamiento muestras de concreto

Método	Lectura (mm)	Asentamiento (mm)	Asentamiento (in)
Fuller	25	280	1
Mínimos Cuadrados	60	255	2,5
Shilstone	100	205	4
Curva de la Tarántula	75	230	3

Tomado de: Elaboración Propia

El grado de asentamiento de cada una de las muestras se calculó a través de la siguiente ecuación:

$$Asentamiento = 305 - altura\ en\ mm\ despues\ del\ asentamiento$$

13.8.2. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Según nuestro asentamiento del diseño teníamos un Arango de asentamientos admisibles de 1 a 4 pulgadas es decir lecturas entre 1 a 100 mm por tal motivo se determina que todos los ensayos están dentro de los limites admisibles para cada uno d ellos métodos sin embargo se observa que los métodos que se basan su cálculo en el porcentaje retenido presentan mayor asentamiento y por consiguiente mayor fluidez o trabajabilidad que los que funcionan con porcentajes pasa…

Tabla 71. Resultados ensayo de asentamiento y resistencia a la compresión

Método	Asentamiento (cm)	Resistencia F´c Promedio los 28 días (MPa.)
Fuller	5	23.54
Mínimos Cuadrados	6.25	21.38
Shilstone	10	18.08
Curva de la Tarántula	**7.5**	21.75

Tomado de: Elaboración Propia

13.9 RESUMEN GENERAL DE RESULTADOS

teniendo en cuenta los anteriores apartados se realiza un resumen y análisis de los diseños de mezcla usados, en relación a la resistencia a la compresión granulometría, trabajabilidad, confiabilidad de resultados, y análisis de varianzas y medias**.**

Tabla 97

Cuadro comparativo, resultados obtenidos por cada método

Método	Tipo de granulometría	Cantidad teórica de material requerida para el diseño de mezcla de cada método					Resistencia compresión				Trabajabilidad	
							f´c diseño	f´c req.	f´c Prom	Cumple	Asentamiento	Cumple
		CEMENTO	AGUA	GRAVA 1	GRAVA 2	ARENA	(MPa)	(MPa)	(MPa)		(cm)	
Fuller por MF	Porcentaje pasa	16%	6%	24.5%	18,53%	25,86%	21	28,3	23,54	SI	5	SI
Mínimos Cuadrados	Porcentaje pasa	16%	6%	25.6%	16,82%	26,44%	21	28,3	21,38	SI	6,25	SI
Curva Shilstone	Porcentaje retenido	16%	6%	25.4%	16,73%	26,72%	21	28,3	18,08	NO	10	SI
Curva. Tarántula	Porcentaje retenido	16%	6%	23.7%	18,48%	26,71%	21	28,3	21,75	SI	7,5	SI

Tomado de: Elaboración Propia

Tabla 98

Cuadro comparativo de resultados

METODO	RESULTADO	OBSERVACIONES
Fuller por MF	Debido a que se evidencia un mayor contenido de grava gruesa se ve representado un mayor desempeño en la resistencia proporcionada por el método	Aunque es evidente una pequeña superioridad en cuanto a los resultados de resistencia alcanzados frente a los demás métodos, ninguno alcanzo la resistencia requerida estimado de 28,3 MPa adicionado el FS
Mínimos Cuadrados.	los resultados arrojados demuestran que este método posee una similitud muy cercana con respecto a la curva de resistencia a la compresión vs tiempo de la f´c de diseño	Como puede observarse en el apartado13.4.2 el valor de las diferencias de medias muestrales es mayor que el valor crítico, Pero en el diseño de mezcla mínimos cuadrados no, por lo que puede decirse que el método y el de la tarántula generan mayor nivel de confianza ya que las resistencias medias son prácticamente iguales.
Curva Shilstone	Este método fue el que arrojo menores resultados de resistencia a la compresión con respecto a los demás encontrándose muy por debajo de la resistencia de diseño. Además, en cuanto al asentamiento el valor de10 cm está muy al límite de lo permitido en cuanto	Sin embargo, es de aclarar que posiblemente pudieron existir fallas humanas al momento de realizar el ensayo de elaboración de muestras impactando negativamente desempeño de la resistencia trayendo consecuencias negativas o incidiendo en el bajo o anormal nivel de los resultados y colocando en riesgo la confiabilidad de los resultados por lo que puede resultar incongruente que teniendo una composición tan similar de materiales este tan alejado de los demás métodos.
Curva. Tarántula	Debido a que presenta un menor contenido de grava gruesa que en los demás métodos permitiendo una mayor acomodación de las partículas, lo que provoca el aumento de la trabajabilidad según los parámetros de la curva de la tarántula.	Aunque No se encontraron diferencias muy considerables a nivel general entre las cantidades de material requeridas para cada diseño de mezcla una pequeña variación puede representar un cambio visible en la manejabilidad

Tomado de: Elaboración Propia

14. CONCLUSIONES

- La resistencia a la compresión de una mezcla de concreto hidráulico normal optimizada mediante el método de la curva de la tarántula supero en un 4% la resistencia de diseño especificada en 21 MPa, en un 2% a la resistencia alcanzada por el diseño de mezcla optimizado mediante el método de mínimos cuadrados, y por debajo del diseño de mezcla optimizado mediante el método de Fuller. Si bien estuvo un 16% por encima del diseño de mezcla optimizado mediante el método del método de Shilstone, debe tenerse en cuenta que, para este pudo cometerse un error durante el proceso de mezclado, pues no alcanzo la resistencia requerida.

- Tomando como referencia los resultados de resistencia a la compresión y trabajabilidad del diseño de mezcla, utilizando el método de optimización por medio de la curva de la tarántula vs métodos de optimización tradicionales estudiados en este trabajo, se puede recomendar a este como un método de optimización de fácil uso con resultados óptimos en valores de resistencia a la compresión y con mayor trabajabilidad de la mezcla.

- La resistencia media a la compresión que se obtuvo del diseño de mezcla optimizado mediante el método de la curva de la tarántula es de 21.75MPa y de los 15 ensayos realizados no más del 10% (dos muestras) estuvieron por debajo de la resistencia requerida f'c como lo indica la NTC 2275, por lo que, elementos estructurales que sean fundidos con la mezcla diseñada mediante este método alcanzarán la resistencia de diseño f'c.

- Al momento de realizar el ensayo de elaboración de muestras para la optimización del método de Shilstone pudieron existir errores que impactaron negativamente el desempeño de la resistencia, pues resultar incongruente que una distribución similar de agregados comparado con los otros métodos arroje valores de resistencia a la compresión a los 7 y 28 días alejados del f'c de diseño 21 MPa

- Los resultados obtenidos, demuestran que, de los métodos usados, la optimización por Mínimos cuadrados y curva de la tarántula mantienen una similitud con la curva de resistencia a la compresión vs tiempo, de la resistencia requerida f'c, y valores de trabajabilidad de 6.25 y 7.5 cm respectivamente, por lo que puede concluirse que son los métodos que mejor relación resistencia a la compresión trabajabilidad manejan.

- El diseño de mezcla que uso la optimización de agregados del método de Fuller, fue el que logro mayor resistencia media MPa y una trabajabilidad medida con un asentamiento de 5 cm, por lo que es un método que garantiza alcanzar y superar la resistencia requerida f'c, pero presentara mayores dificultades en el proceso de colocación

- No existe un método cuantitativo y establecido universalmente para dosificar agregados, pero los resultados del presente documento, sumados a los del equipo del equipo de investigación de Oklahoma donde se comparó el rendimiento de trabajabilidad y valores de resistencia a la compresión, se considera a la curva de la tarántula como un método confiable para mejorar la trabajabilidad del concreto en estado fresco sin perder sus propiedades mecánicas.

- Los métodos de optimización de muestras granulométricas combinadas como Shilstone y Curva de la tarántula no son eficientes cuando se dispone de un único tamaño de agregado fino y un único tamaño de agregado grueso, para que se cumpla los rangos propuestos en las gráficas es necesario tener un tercer tamaño intermedio que pronuncie dicho comportamiento

- Los Diseños de mezcla optimizados de manera ideal no son de posible aplicación general en todas las construcciones debido a la variación de las necesidades específicas de colocación y acabado, bien como de su disponibilidad y su costo.

- El diseño de mezcla que usa el método de la curva de la tarántula puede tener varios cambios que pueden variar el porcentaje de dosificación de los agregados, ya que la recomendación que se realiza es, que la curva granulométrica obtenida no sobrepase los límites de la gráfica y a su vez no se encuentre cerca de los mismos.

- Finalmente se recomienda el uso del método de la curva de la Tarántula como una Herramienta practica y eficaz al momento de optimizar las proporciones de agregados pétreos en los diseños de mezcla de concreto debido a su fácil aplicación, elaboración y resultados exactos cuando se trata de resistencia requerida y asentamiento de diseño,

- En cuanto a Los métodos de Fuller y mínimos cuadrados es recomendable su aplicación, sin embargo, aunque se obtuvieron los resultados esperados en cuanto a resistencia a la comprensión no presentan un desarrollo óptimo de la trabajabilidad

15. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Shilstone J., "Concrete Mixture Optimization". Concrete International, Michigan, (1990), Vol. 12 Issue 6, Pág. 3.

- Kumar Metha y Paulo Monteiro. Concreto. Estructura, propiedades y materiales. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. (1997). Pág. 2.

- Laura Huanca, Samuel. Diseño de Mezclas de Concreto [en línea]. Madrid: Universidad Nacional del Altiplano [citado 10 noviembre, (2016)].

- Gomà, Fernando (1979). Cemento portland y otros aglomerantes, El. Barcelona: Técnicos Asociados, S.A. / ISBN 84-7146-192-7.

- Trujillo, D., Valero, C. C., & Lozano, H. J. (2015). Comparación del comportamiento de una mezcla asfáltica adicionada con fibras de terlenka y una convencional. Trabajo de grado para optar al título de especialista en diseño y construcción de vías y aeropistas.

- Smith M. R. and L. Collins. Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas. Barcelona, 1994.

- Padilla Rodríguez, Alejandro. Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas…, Tesina, Universitat Politécnica de Catalunya, 2004, pág. 5, Disponible en internet: https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3334

- Artículo 400-13 de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del Instituto Nacional de Vías – INVIAS, en el numeral 400.2 Materiales.

- ASTM D1129-13(2020), Standard Terminology Relating to Water, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, disponible en internet: www.astm.org

- Merrit, Frederick S.; Manual del ingeniero civil, tomo II, 3ª Ed, J. W.; Composition and Properties of Concrete, McGraw-Hill Book Company, New York, 1968. 7.

- Giraldo Bolívar, Orlando; Guía práctica para el diseño de mezclas de hormigón; Bogotá, 1987.

- Marllon D. Cook. (2013). *NVESTIGATION OF OPTIMIZE GRADED CONCRETE.* oklahoma.

- Mosquera, S. (2019). Métodos de optimización de muestras granulometricas utilizadas en el diseño de mezcla de concreto simple hidráulico. Bogotá.

- NTC 2275, N. (1997). *PROCEDIMIENTO RECOMENDADO PARA LA EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE RESISTENCIA DEL CONCRETO.* Bogotá.