# ELABORACIÓN Y DESARROLLO DE CONCRETO ESTRUCTURAL CON CENIZA DE MADERA COMO SUSTITUTO PARCIAL DEL AGREGADO FINO

**GEOVANNY JOSE MENDEZ ARGEL**

**UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS**
**FACULTAD TECNOLÓGICA**
**TECNOLOGÍA EN CONSTRUCCIONES CIVILES**
**BOGOTÁ**
**2024**

# ELABORACIÓN Y DESARROLLO DE CONCRETO ESTRUCTURAL CON CENIZA DE MADERA COMO SUSTITUTO PARCIAL DEL AGREGADO FINO

**GEOVANNY JOSE MENDEZ ARGEL**

**Monografía**

**Docente director:**
**Ing. MILTON MENA SERNA**

**UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS**
**FACULTAD TECNOLÓGICA**
**TECNOLOGÍA EN CONSTRUCCIONES CIVILES**
**BOGOTÁ**
**2024**

**Nota de aceptación:**

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

**Firma del presidente del jurado**

_____

**Firma del jurado**

_____

**Firma del tutor académico**

Bogotá D.C 10 de Julio de 2024

A Dios por la oportunidad de estar en esta etapa de la vida.

A mis padres por su apoyo incondicional.
A mis hermanos por sus consejos.

A el ingeniero Milton Mena por su tiempo y conocimiento.

Al personal del laboratorio de Suelos y pavimentos de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas por brindarme los espacios para desarrollar las practicas correspondientes.

**Muchas Gracias por acompañarme en este proceso.**

**CONTENIDO**

**Pag**


1 RESUMEN EJECUTIVO ..... 22

2 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROBLEMA ..... 23

3 JUSTIFICACIÓN ..... 24

4 ALCANCE ..... 25

5 OBJETIVOS ..... 26

5.1 OBJETIVO GENERAL ..... 26

5.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS ..... 26

6 MARCO DE REFERENCIA ..... 27

6.1 MARCO DE ANTECEDENTES ..... 27

6.2 MARCO TEÓRICO ..... 30

6.2.1 Agregados o áridos ..... 30

6.2.2 Clasificación según su procedencia ..... 30

6.2.3 Agregados artificiales ..... 30

6.2.4 Concreto ..... 31

6.2.5 Características y funciones de los componentes ..... 32

6.2.5.1 Cemento ..... 32

6.2.5.2 Agua ..... 32

6.2.5.3 Aire ..... 32

6.2.5.4 Aditivos ..... 33

6.2.6 Concreto liviano ..... 33
6.2.6.1 Ventajas del concreto de peso liviano ..... 34
6.2.6.2 Desventajas del concreto de peso liviano ..... 35
6.2.6.3 Agregados utilizados en la fabricación de concreto liviano ..... 37
6.2.6.4 Agregados orgánicos ..... 41
6.2.7 DISEÑO DE MEZCLA ..... 43
6.2.7.1 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO ..... 51
7 DISEÑO EXPERIMENTAL ..... 87
7.1 ELECCIÓN DE LOS FACTORES, NIVELES Y RANGOS. ..... 87
7.2 SELECCIÓN DE LA VARIABLE DE RESPUESTA ..... 92
7.3 REALIZACIÓN DEL EXPERIMENTO ..... 93
8 OBTENCIÓN DE MUESTRAS REPRESENTATIVAS ..... 98
8.1 CRONOGRAMA DE ENSAYOS DE LABORATORIO ..... 99
9 CARACTERIZACIÓN FÍSICA ..... 100
9.1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO ..... 100
9.2 MASAS UNITARIAS AGREGADO FINO Y AGREGADO GRUESO ..... 106
9.3 DENSIDAD Y ABSORCIÓN EN AGREGADOS GRUESOS ..... 111
9.4 DENSIDAD Y ABSORCIÓN EN AGREGADOS FINOS ..... 117
9.5 HÚMEDAD NATURAL DEL AGREGADO GRUESO Y FINO ..... 123
9.6 ÍNDICE DE ALARGAMIENTO Y APLANAMIENTO ..... 127
10 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA ..... 133

10.1 FLUORESCENCIA DE RAYOS X ..... 133

10.2 CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA EN EL AGREGADO FINO ..... 137

11 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA ..... 141

11.1 DESGASTE EN MAQUINA DE LOS ÁNGELES ..... 141

11.2 ENSAYO MICRO DEVAL ..... 146

12 DISEÑO DE MEZCLA ..... 152

12.1 Selección del asentamiento ..... 154

12.2 Elección del tamaño máximo nominal (TMN) ..... 155

12.3 Estimación del contenido de aire ..... 155

12.4 Estimación de la cantidad de agua ..... 156

12.5 Estimación de la relación a/c ..... 157

12.6 Estimación del contenido de cemento ..... 160

12.7 Verificación de la granulometría de acuerdo con los parámetros establecidos por la NTC 174 ..... 161

12.8 Optimización de la muestra de agregados para conocer el porcentaje adecuado para el diseño de mezcla. ..... 162

12.9 Estimación del contenido de grava y arena ..... 167

12.10 Estimación del contenido de grava (En volumen) ..... 167

12.11 Estimación del contenido de arena (En volumen) ..... 168

12.12 Cálculo de la masa de agregado grueso. ..... 168

12.13 Cálculo de masa de agregado fino. ..... 169

12.14 Cálculo del peso del agregado grueso en estado húmedo (Ajuste de agregado por humedad natural). ..... 170

12.15 Cálculo del peso del agregado fino en estado húmedo (Ajuste de agregado por humedad natural). 170

12.16 Cálculo de la cantidad de agua real para utilizar en la mezcla ..... 171

12.17 Calculo cantidad de agua real para utilizar en la mezcla..... 171

12.18 Calculo total de agua en exceso en kg. ..... 172

12.19 Entrega de la dosificación teórica de la mezcla. ..... 174

13 ENSAYO DE ASENTAMIENTO DEL CONCRETO ..... 175

13.1 Asentamiento concreto standard (Sin adición de ceniza de madera) ..... 176

13.2 Asentamiento concreto con adición de ceniza de madera ..... 177

13.3 Cantidades definitivas para 6 probetas cilíndricas ..... 178

14 FUNDICIÓN DE PROBETAS CILÍNDRICAS DE CONCRETO ..... 180

15 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS DE CONCRETO ..... 185

15.1 MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS ..... 185

15.2 PROCEDIMIENTO GENERAL DEL ENSAYO..... 186

15.3 RESULTADOS OBTENIDOS..... 187

15.4 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS..... 189

15.5 CÁLCULO DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD ..... 189

16 ANÁLISIS DE RESULTADOS..... 191

16.1 PROPIEDADES DEL CONCRETO ESTRUCTURAL EN ESTADO FRESCO... 191

16.1.1 Consistencia, trabajabilidad y homogeneidad ..... 191

16.1.1.1 Análisis del Asentamiento realizado al arreglo experimental estándar ..... 194

16.1.1.2 Análisis del Asentamiento realizado al arreglo experimental con ceniza de madera como sustituto parcial (20%) del agregado fino ..... 196

16.2 PROPIEDADES DEL CONCRETO ESTRUCTURAL EN ESTADO ENDURECIDO 197

16.2.1 Análisis de la Resistencia a la compresión ..... 197

16.2.1.1 Cilindros de concreto standard y con ceniza de madera como sustituto parcial del agregado fino (7 días) ..... 198

16.2.1.2 Cilindros de concreto standard y con ceniza de madera como sustituto parcial del agregado fino (14 días) ..... 199

16.2.1.3 Cilindros de concreto standard y con ceniza de madera como sustituto parcial del agregado fino (28 días) ..... 200

16.2.2 DESARROLLO DE LA RESISTENCIA VS TIEMPO ..... 202

16.2.2.1 ¿Qué arreglo experimental alcanzó mayor resistencia a la compresión a la edad de 28 días? ..... 202

16.2.2.2 ¿Cumple el arreglo experimental (sustitución de ceniza 20%) con las especificaciones requeridas para concreto estructural? ..... 204

16.2.2.3 ¿Por qué los arreglos experimentales no alcanzaron la resistencia requerida F’c req de 29,3 Mpa? ..... 204

16.2.3 ANÁLISIS DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD ..... 206

17 CONCLUSIONES ..... 208

18 RECOMENDACIONES ..... 213

19 BIBLIOGRAFÍA ..... 215

## LISTA DE TABLAS

**Pag**

Tabla 1. Clasificación general del agregado según su tamaño ..... 31

Tabla 2. Clasificación del agregado según su densidad ..... 31

Tabla 3. Criterios de aceptación para ensayos de la calidad del agua ..... 49

Tabla 4. Asentamientos recomendados para diversos tipos de construcción y sistemas de colocación y compactación ..... 53

Tabla 5. Tamaños máximos del agregado según tipo de construcción..... 55

Tabla 6. Cantidad aproximada de aire esperando en concreto sin aire incluido y niveles de aire incluido para diferentes tamaños máximos de agregado ..... 58

Tabla 7. Requerimiento aproximado de agua de mezclado par diferentes asentamientos y tamaños máximos de agregado, con partículas de forma angular y textura rugosa, en concreto sin aire incluido ..... 59

Tabla 8. Requerimiento aproximado de agua de mezclado par diferentes asentamientos y tamaños máximos de agregado, con partículas de forma angular y textura rugosa, en concreto con aire incluido ..... 59

Tabla 9. Resistencia promedio a la compresión requerida cuando no hay datos disponibles para establecer una desviación estándar de la muestra ..... 61

Tabla 10. Correspondencia entre la resistencia a la compresión a los 28 días de edad y la relación agua-cemento para los cementos colombianos, portland tipo I, en concretos sin aire incluido. 62

Tabla 11. Correspondencia entre la resistencia a la compresión a los 28 días de edad y la relación agua-cemento para los cementos colombianos, portland tipo I, en concretos con aire incluido. 62

Tabla 12. Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto ..... 67

Tabla 13. Peso seco y volumen absoluto de los ingredientes por metro cúbico de concreto. 68

Tabla 14. Límites de gradación recomendados para granulometrías continuas en porcentajes que pasa para distintos tamaños máximos de agregado. ..... 72

Tabla 15. Ejemplo de combinación de agregados para obtener una granulometría tipo en porcentaje que pasa ..... 76

Tabla 16. Límites de granulometría propuestos para agregado grueso ..... 76

Tabla 17. Límites de granulometría propuestos para agregado fino ..... 77

Tabla 18. Principales causas de variaciones de resistencia ..... 88

Tabla 19. Resumen de ensayos de resistencia a la compresión para los dos arreglos experimentales ..... 92

Tabla 20. Cronograma ensayos de laboratorio ..... 99

Tabla 21. Masa mínima de muestra para ensayo según tamaño máximo nominal del agregado 101

Tabla 22. Datos obtenidos de acuerdo a granulometría agregado grueso ..... 102

Tabla 23. Analisis granulometrico del agregado fino ..... 103

Tabla 24. Datos obtenidos de acuerdo a granulometría agregado fino ..... 104

Tabla 25. Analisis granulometrico del agregado fino ..... 104

Tabla 26. Capacidad de moldes para ensayo de masas unitarias a agregados ..... 107

Tabla 27. Tabla Requisitos de moldes para ensayo de masas unitarias a agregados ..... 107

Tabla 28. Resultados obtenidos luego del ensayo de masa unitaria suelta del agregado grueso 109

Tabla 29. Resultados obtenidos luego del ensayo de masa unitaria compacta del agregado grueso 109

Tabla 30. Resultados obtenidos luego del ensayo de masa unitaria suelta del agregado fino 109

Tabla 31. Resultados obtenidos luego del ensayo de masa unitaria compacta del agregado fino 110

Masa mínima de las muestras de agregado grueso para ensayo de densidad y absorción..... 113

Tabla 32. Resultados obtenidos luego del ensayo de densidad y absorción para el agregado grueso 116

Tabla 33. Resultados obtenidos en ensayo de denstidad del material granular fino..... 120

Tabla 34. Denstidades finales y absorción del material agregado fino..... 122

Tabla 35. Masa mínima para ensayo de humedad en agregados ..... 124

Masa mínima requerida para ensayo..... 128

Tabla 36. Resultados obtenidos luego del ensayo de indice de alargamiento y aplanamiento 132

Tabla 37. Resultados obtenidos caracterización por fluorescencia de rayos X ..... 135

Tabla 38. Comparativo composición química de los materiales cementantes empleados.... 135

Tabla 39. Escala de vidrios de colores de referencia ..... 139

Tabla 40. Granulometrías ideales de acuerdo al tipo de gradación ..... 142

Tabla 41. Determinación de la gradación ideal para ensayo de abrasión ..... 142

Tabla 42. Número de esferas a utilizar para ensayo de acuerdo a gradación ..... 143

Tabla 43. Tabla Resumen y resultados finales ensayo máquina de los ángeles ..... 145

Tabla 44. Preparación de la muestra seca al horno de 19 mm ..... 147

Tabla 45. Preparación de la muestra seca al horno tamaño menor a 16 mm ..... 147

Tabla 46. Preparación de la muestra seca al horno tamaño menor a 12.5 mm ..... 147

Tabla 47. Tiempo indicado según la gradación indicada ..... 148

Tabla 48. Resultados obtenidos ensayo Micro Deval ..... 151

Tabla 49. Datos generales del material para diseñar el elemento estructural ..... 153

Tabla 50. Asentamiento recomendado según especificaciones ..... 154

Tabla 51. Tamaños máximos de agregados según tipo de construcción ..... 155

Tabla 52. Contenido de aire de acuerdo al tamaño máximo nominal ..... 156

Tabla 53. Requerimiento aproximado de agua de mezclado par diferentes asentamientos y tamaños máximos de agregado, con partículas de forma angular y textura rugosa, en concreto sin aire incluido 157

Tabla 54. Resistencia promedio a la compresión requerida cuando no hay datos disponibles para establecer una desviación estándar de la muestra ..... 158

Tabla 55. Correspondencia entre la resistencia a la compresión a los 28 días de edad y la relación agua-cemento para los cementos colombianos, Portland tipo I, en concretos sin aire incluido. 159

Tabla 56. Verificación franja granulométrica agregado grueso de acuerdo a normativa ..... 161

Tabla 57. Verificación franja granulométrica agregado fino de acuerdo a normativa ..... 161

Tabla 58. Gradaciones ideales Fuller-Thompson de agregados para concreto en porcentaje pasa 163

Tabla 59. Porcentajes reales vs porcentajes Ideales según Fuller-Thompson ..... 163

Tabla 60. Resumen del método de optimización por mínimos cuadrados..... 166

Tabla 61. Resumen cantidades de los componentes del concreto de acuerdo al volumen .. 169

Tabla 62. Cantidades para 1 m³ de concreto ajustado por humedad..... 173

Tabla 63. Cantidades para mezcla de prueba ajustadas por humedad ..... 174

Tabla 64. Resultados finales para ensayo de asentamiento del concreto para los dos arreglos experimentales ..... 177

Tabla 65. Dimensiones de la probeta cilíndrica..... 178

Tabla 66. Cantidades definitivas para dosificación de concreto estándar..... 179

Tabla 67. Cantidades definitivas para dosificación de concreto con sustituto parcial..... 179

Tabla 68. Edad de ensayo probetas cilíndricas ..... 186

Tabla 69. Resultados Resistencia a compresión cilindros de concreto Estándar..... 188

Tabla 70. Resultados Resistencia a compresión cilindros de concreto con ceniza de madera 188

Tabla 71. Análisis Resultados Resistencia a compresión cilindros de concreto Estándar... 202

Tabla 72. Análisis Resultados Resistencia a compresión cilindros de concreto con ceniza de madera 202

Tabla 73. Factor modificador para determinar módulo de elasticidad ..... 190

Tabla 74. Análisis del módulo de elasticidad respecto al tiempo en distintas edades para arreglo estándar 190

Tabla 75. Análisis del módulo de elasticidad respecto al tiempo en distintas edades para arreglo con ceniza de madera ..... 207

## LISTA DE GRÁFICOS

**Pag**

Gráfico 1. Densidades de concretos de peso liviano, teniendo en cuenta el material de fabricación 34

Gráfico 2. Propiedades típicas de concretos de peso ligero comunes ..... 37

Gráfico 3. Grupos de concretos ligeros ..... 42

Gráfico 4. Influencia del tamaño máximo en la resistencia ..... 56

Gráfico 5. Correspondencia entre la resistencia a la compresión a los 28 días de edad y la relación agua-cemento para los cementos colombianos, portland tipo I, en concretos con y sin aire incluido. 62

Gráfico 6. Ejemplo de granulometría combinada (Método Gráfico) ..... 77

Gráfico 7. Curvas correspondientes a limites segun normativa y gradación del agregado grueso 103

Gráfico 8. Curvas correspondientes a limites segun normativa y gradación del agregado fino 105

Gráfico 9. Estimación del contenido de agua según asentamiento ..... 156

Gráfico 10. Correspondencia entre la resistencia a la compresión a los 28 días de edad y la relación agua-cemento para los cementos colombianos, portland tipo I, en concretos con y sin aire incluido. 158

Gráfico 11. Análisis de la resistencia obtenida respecto al tiempo para los arreglos experimentales 203

Gráfico 12. Análisis del módulo de elasticidad I obtenida respecto al tiempo para los arreglos experimentales 206

Gráfico 13. Análisis del módulo de elasticidad II obtenida respecto al tiempo para los arreglos experimentales 207

## LISTA DE FOTOGRAFÍAS

**Pag**


Fotografía 1. Asador utilizado para el proceso de combustión de la madera ..... 98

Fotografía 2. Recolección de ceniza de madera..... 98

Fotografía 3. Recolección de material ceniza de madera ..... 98

Fotografía 4. Proceso de obtención masa del agregado grueso ..... 102

Fotografía 5. Proceso de obtención masa del agregado fino ..... 102

Fotografía 6. Proceso de tamizado material granular ..... 102

Fotografía 7. Proceso de determinación de masa material granular ..... 108

Fotografía 8. Proceso de determinación de masa material granular ..... 108

Fotografía 9. Masa material granular en canasta de suspensión..... 114

Fotografía 10. Proceso de determinación de masa material granular ..... 114

Fotografía 11. Material granular secado en el horno para determinar masa final..... 116

Material granular fino en molde cónico para determinar condición SSS ..... 119

Fotografía 12. Determinación de masa de material fino ..... 119

Fotografía 13. Material granular fino en condición SSS..... 119

Fotografía 14. Material granular fino en baño de maría para regular temperatura ..... 120

Fotografía 15. Picnómetro + material granular fino en condición SSS ..... 120

Fotografía 17. Masa en condición de humedad natural agregado grueso..... 124

Fotografía 16. Masa en condición de humedad natural agregado fino ..... 124

..... 125

Fotografía 17. Proceso de secado en horno material granular ..... 125
Fotografía 18. Masa final o seca del agregado grueso ..... 125
Fotografía 19. Masa final o seca del agregado fino ..... 125
Fotografía 20. Proceso de determinación de partículas largas ..... 129
Fotografía 21. Calibrador metálico de barras para longitudes ..... 129
Fotografía 22. Calibrador metálico de aberturas para determinar particulas planas ..... 129
Fotografía 23. Ceniza de madera para ensayo de fluorescencia de X rayos ..... 134
Fotografía 24. Espectometro de fluorescencia de rayos X ..... 134
Fotografía 25. Masa de hidróxido de Sodio para solución ..... 138
Fotografía 26. Agregado fino dispuesto para ensayo ..... 138
Fotografía 27. Solución de hidróxido de Sodio ..... 138
Fotografía 28. Resultados obtenidos al comparar color obtenido en ensayo ..... 139
Fotografía 29. Solución + material dejado reposo ..... 139
Fotografía 30. Selección de partículas de acuerdo con gradación ..... 143
Fotografía 31. Masa correspondiente de acuerdo con gradación ..... 143
Fotografía 32. Tambor máquina de los ángeles ..... 144
Fotografía 33. Material después de proceso de abrasión y desgaste ..... 144
Fotografía 34. Masa final después de proceso de abrasión y desgaste ..... 144
Fotografía 35. Material en inmersión de acuerdo a cada gradación ..... 148
Fotografía 36. Preparación del equipo para ensayo ..... 149
Fotografía 37. Material granular para ensayo de desgaste y abrasión ..... 149

Fotografía 38. Aparato Micro Deval para ensayo de abrasión y desgaste ..... 149
Fotografía 39. Material lavado después del proceso de desgaste ..... 150
Fotografía 40. Materiales para ensayo de asentamiento ..... 176
Fotografía 41. Asentamiento para arreglo Estándar ..... 176
Fotografía 42. Asentamiento arreglo con sustituto II ..... 177
Fotografía 43. Asentamiento arreglo con sustituto I ..... 177
Fotografía 44. Trompo o mezclador de concreto ..... 181
Fotografía 45. Material para fundición de probetas cilíndricas ..... 181
Fotografía 46. Preparación trompo para mezclar ..... 181
Fotografía 47. Camisas cilíndricas 6x12 pulgadas para fundición ..... 181
Fotografía 48. Adición de la ceniza de madera ..... 182
Fotografía 49. Fundición de probeta cilíndrica ..... 182
Fotografía 50. Probetas cilíndricas después de 24 horas ..... 183
Fotografía 51. Desencofrado de probetas cilíndricas ..... 183
Fotografía 52. Disposición de probetas cilíndricas para iniciar curado I ..... 184
Fotografía 53. Disposición de probetas cilíndricas para iniciar curado II ..... 184
Fotografía 54. Cilindros de concreto dispuestos a fallo ..... 198
Fotografía 55. Masa de cilindro de concreto ..... 198
Fotografía 56. Fallo de cilindro estándar a 7 días ..... 199
Fotografía 57. Falla de cilindro o con ceniza a 7 días ..... 199
Fotografía 58. Fallo de cilindro estándar a 14 días ..... 200

Fotografía 59. Fallo de cilindro con ceniza a 14 días..... 200

Fotografía 60. Cilindros de concreto dispuesto a fallo..... 201

Fotografía 61. Fallo de cilindro estándar a 28 días ..... 201

Fotografía 62. Fallo de cilindro con ceniza a 28 días..... 201

Fotografía 63. Fallo de cilindro estándar a 28 días ..... 201

# 1 RESUMEN EJECUTIVO

El concreto es el material más usado en la industria de la construcción, con el fin de mejorar sus características físicas y químicas por medio de la adición de compuestos se ha optimizado su rendimiento y aprovechamiento en el gremio, por lo cual, en la búsqueda de nuevas metodologías para la implementación de otro tipo de insumos como lo son los recursos desechados por la industria en general, se decide trabajar en los procesos de obtención de materias primas y por supuesto mitigar el impacto del desarrollo urbanístico para con el medio ambiente.

Producto de estas nuevas metodologías implementadas se encuentra el concreto liviano, el cual se desarrolla a partir de materiales desechados por la industria como lo son: La ceniza volante y la escoria de alto horno. Es por esto que el estudiante Geovanny José Mendez Argel en un principio decide trabajar en el desarrollo de un concreto liviano con una sustitución parcial de ceniza de madera para el agregado fino pero con el ánimo de experimentar otras fuentes dentro de los insumos conocidos cambia el enfoque y al tener en cuenta que el agregado no cumple con las especificaciones de la normativa NTC 4045 para agregados livianos opta por desarrollar un concreto estructural con ceniza de madera (De un asadero local) como sustituto parcial del agregado fino en un porcentaje del 20 % y analizar su comportamiento respecto a un concreto estructural convencional sin ninguna modificación en sus características.

El presente documento contiene un resumen de la investigación de los conceptos teóricos, el alcance de los objetivos generales y específicos, junto con la metodología planteada para alcanzarlos, mencionando las posibles dificultades que se puedan presentar durante su desarrollo.

# 2 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROBLEMA

La extracción de recursos naturales para la obtención de los minerales necesarios en la elaboración del concreto perjudica notablemente el suelo y medio ambiente, por lo que la necesidad de implementar materias primas que optimicen los procesos productivos se ha convertido en un gran reto para la industria de la construcción.

A su vez los costos de dichos insumos debido a la inflación impactan en la economía del gremio, por lo cual es necesario optimizar procesos supliendo algunas materias primas o modificando las proporciones que requiere la elaboración de materiales de construcción y que se extraen de recursos naturales. Lo que conlleva a una sustentabilidad implícita en la idealización de este trabajo de investigación.

En el caso de la industria de la madera el 40-55% de insumo inicial representa el desperdicio que se genera en los procesos de producción, (Food and Agriculture Organization, [FAO],1991) por lo que el aprovechamiento de la ceniza de madera podría reducir costos en otras industrias no sólo en construcción sino en las energéticas y demás evidenciado en otras investigaciones que se han realizado a nivel mundial por instituciones que buscan una alternativa a la hora de optimizar y mitigar el impacto ambiental.

Por lo tanto, trabajar con materiales alternativos como la ceniza de madera puede abrir nuevos campos de diseño, implementación y aprovechamiento de materiales que se consideraban desechos pero que son innovadores y pueden impulsar la economía, para lo cual requiere de investigaciones más profundas.

# 3 JUSTIFICACIÓN

A través de este trabajo de grado se busca evaluar el uso de una materia prima conocida la cual no ha sido implementada en la industria de la construcción y que está siendo desechada, a su vez explorar su comportamiento en la fabricación de concreto.

Es de suma importancia trabajar y explorar nuevas alternativas para mitigar el impacto de la industria de la construcción en la explotación de los recursos naturales en el medio ambiente. En Colombia no se tienen registros de un trabajo o investigación sobre este tema, por lo cual, es muy interesante iniciar con un registro que permita incentivar a otros estudiantes e investigadores a profundizar más sobre este tema.

En cuanto a los costos de los materiales de construcción, también es de gran utilidad encontrar maneras de reducir el valor de producción del concreto y porque no iniciar una alternativa de negocio de acuerdo con el enfoque que se le dé a esta investigación.

# 4 ALCANCE

El presente proyecto de grado denominado “ELABORACIÓN Y DESARROLLO DE CONCRETO ESTRUCTURAL CON CENIZA DE MADERA COMO SUSTITUTO PARCIAL DEL AGREGADO FINO”, va encaminado a determinar si el material de sustitución permite obtener un concreto con el comportamiento y resistencia a la compresión propios de un concreto estructural habitual, abriendo las posibilidades de darle un uso a esta ceniza de madera que actualmente es desechada.

En caso de que el concreto satisfaga los requerimientos de durabilidad, resistencia y manejabilidad exigidos por las normas técnicas de producción de concreto tales como la Norma Técnica Colombiana NTC y Norma Sismo Resistente del 2010 (NSR-10), esta monografía brindará información fundamental para profundizar en el futuro en la implementación de este material y sus implicaciones en la industria de la construcción y la responsabilidad empresarial con el medio ambiente.

Para evaluar este proyecto de grado se compara el desarrollo de resistencia a la compresión a los 28 días de dos arreglos experimentales de concreto, uno de ellos es una mezcla inalterada es decir un concreto estructural estándar y otra en la que se toma ceniza de madera como sustituto parcial (20%) del agregado fino.

# 5 OBJETIVOS

## 5.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar muestras de concreto estructural con ceniza de madera como sustituto parcial del agregado fino para su posterior análisis en cuanto a la resistencia a compresión a edades de 7, 14 y 28 días.

## 5.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Identificar las propiedades del concreto estructural en estado fresco como: la consistencia, trabajabilidad, homogeneidad y la resistencia a compresión en estado endurecido.

- Determinar si el porcentaje establecido (20%) para la sustitución del agregado fino por la ceniza de madera presenta un comportamiento favorable para concreto estructural teniendo en cuenta el ensayo de resistencia a la compresión.

- Identificar cuál de los dos arreglos experimentales presenta el mayor desarrollo de resistencia a la compresión a los 28 días.

# 6 MARCO DE REFERENCIA

## 6.1 MARCO DE ANTECEDENTES

Algunas de las investigaciones realizadas en los últimos años acerca de la implementación de ceniza de madera en el concreto o en el agregado fino son las siguientes:

- La estudiante de Ingeniería Civil de la Universidad Técnica de Ambato en Ecuador, Karol Natalí Vivas Villarreal expone en su trabajo de grado denominado" Diseño de un hormigón liviano elaborado con ceniza de madera como sustituto parcial del agregado fino" las proporciones adecuadas de la adición de ceniza de madera para elaborar un hormigón ligero con una resistencia a la compresión de 180 kg/cm².

- Los ingenieros Juan Martín García Chumacero y Guillermo Gustavo Arriola Carrasco de la Universidad Señor de Sipán en Perú, Luigi Italo Villena Zapata de la Universidad César Vallejo en Perú y Sócrates Pedro Muñoz Pérez de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas en Perú, exponen en su artículo denominado "Resistencia del Concreto Utilizando Adición Parcial de Ceniza de Madera Residual Respecto al Cemento" la implementación de material sustentable como lo son los residuos de la quema de ladrillos artesanales para evaluar la influencia de la incorporación de ceniza de madera en las propiedades mecánicas del concreto, con incorporaciones de 8%, 12% y 16%.

- Según Gluitz y Marafão (2013), en su investigación "Uso de ceniza de madera de eucalipto para reemplazar parcialmente el cemento Pórtland en el mortero" estudiaron la aplicación de la ceniza de eucalipto en las propiedades del mortero debido a que estos dan propiedades

cementantes al reaccionar con la puzolana del cemento. Para tal fin elaboraron muestras con adicciones de 0 %, 5 %, 10 %, 15 % y 20 % en sustitución del cemento, para establecer el comportamiento en las propiedades físicas y mecánicas como la resistencia a la compresión y la flexión.

- Según el artículo "Durability studies on concrete with wood ash additive (Estudios de durabilidad del hormigón con adiciones de ceniza de madera)" de los autores C.Sashidhar, H. Sudarsana Rao en la 35a Conferencia - Nuestro Mundo en Concreto y Estructuras concluye que: La resistencia a la compresión a los 28 días de curado normal del concreto con adición de ceniza de madera decrece a medida que el contenido de la ceniza de madera aumenta en cantidades expresadas en porcentaje en un intervalo de 0 a 30.

- Según Villanueva (2017), en su investigación: "Resistencia del concreto f'c = 210 kg/cm² con sustitución de 15 % de cemento por cenizas de eucalipto de hornos artesanales", formuló el objetivo general: se activó térmicamente las cenizas de eucalipto a 450° C en un tiempo de 2 horas, que es una temperatura óptima, con ello se producirán óxidos deseados. También se supo que la composición química de las cenizas de eucalipto, indica su potencial como puzolana, ya que contiene un 88.23% de componentes puzolánicos en concordancia con la norma ASTM C-618.

- Según la Revista Internacional de Investigación en Ingeniería y Tecnología mediante la publicación "Wood ash as an effective raw material for concrete blocks (Ceniza de madera como materia prima para bloques de hormigón)" de los autores P. Subramaniam, K. Subasinghe, W. Keerthi en la Sección de Tecnología Ambiental del Instituto de Tecnología

Industrial se concluye que: En la utilización de ceniza de madera como sustituto parcial del contenido de cemento en una mezcla con arena como agregado fino para la elaboración de bloques con una edad de 7, 14 y 21 días, la óptima resistencia a la compresión está dada por el 15% de reemplazo del cemento después de 21 días de curado.

## 6.2 MARCO TEÓRICO

### 6.2.1 Agregados o áridos

Debido a que el concreto está constituido en su mayor parte por agregados (70-80% en volumen), éstos no son menos importantes que la pasta de cemento endurecida, el agua libre, el aire naturalmente atrapado o los aditivos, Por el contrario, gran parte de las características del concreto, tanto en estado plástico como en estado endurecido, dependen de las características y propiedades de los agregados, las cuales deber ser estudiadas para obtener concretos de calidad y económicos.

Los agregados son aquellos materiales inertes, de forma granular, naturales o artificiales, que aglomerados por el cemento portland en presencia de agua conforman un todo compacto conocido como concreto u hormigón.

### 6.2.2 Clasificación según su procedencia

**Agregados naturales**

Son todos aquellos que provienen de la explotación de fuentes naturales tales como depósitos de arrastres fluviales (arenas y gravas de río) o de glaciares (cantos rodados) y de canteras de diversas rocas y piedras naturales. Se pueden aprovechar en su granulación natural o triturándolos mecánicamente, según sea el caso, de acuerdo con las especificaciones requeridas.

### 6.2.3 Agregados artificiales

Estos agregados se obtienen a partir de productos y procesos industriales tales como: arcillas expandidas, escorias de alto horno, Clinker, limaduras de hierro y otros. Por lo general estos agregados son más ligeros o pesados que los ordinarios. (Sánchez, 2001, p.65)

*Tabla 1. Clasificación general del agregado según su tamaño*

| Tamaño de las particulas en mm (pulg) | Denominación más corriente | Clasificación | Clasificación como agregado para concreto |
|---|---|---|---|
| Inferior a 0,002 | Arcilla | Fracción muy fina | No recomendable |
| Entre 0,002 - 0,074 (N° 200) | Limo | | |
| Entre 0,074 - 4,76 (N° 4) | Arena | Agregado fino | Material apto para producir concreto |
| Entre 4,76 - 19,1 (N° 4 - 3/4") | Gravilla | Agregado grueso | |
| Entre 19,1 - 50,8 ( 3/4" - 2") | Grava | | |
| Entre 50,8 - 152,4 (2" - 6") | Piedra | | |
| Superior a 152,4 | Rajón, piedra bola | | |

*Fuente: Tomado de SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. Tecnología del Concreto y del Mortero. 5 ed. Bogotá D.C. Bhandar editores LTDA. 2001*

*Tabla 2. Clasificación del agregado según su densidad*

| Tipo de concreto | Peso unitario aprox. Del concreto (kg/m3) | Peso unitario del agregado (kg/m3) | Ejemplo de utilización | Ejemplo de agregado |
|---|---|---|---|---|
| Ligero | 400-800 | 60-480 | Concreto para aislamientos | Piedra pómez |
| | 950-1350 | 480-1040 | Concreto para rellenos y mamposteria no estructural | Perlita |
| | 1450-2000 | | Concreto estructural | |
| Normal | 2000-2500 | 1300-1600 | Concreto estructural y no estructural | Canto rodado, Agregados de río |
| Pesado | 2500-5600 | 3400-7500 | Concreto para protección contra radiación gamma o X, y contrapesas | Piedra barita, magnetita |

*Fuente: Tomado de SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. Tecnología del Concreto y del Mortero. 5 ed. Bogotá D.C. Bhandar editores LTDA. 2001*

### 6.2.4 Concreto

El concreto u hormigón puede definirse como la mezcla de un material aglutinante (Cemento portland hidráulico), un material de relleno (agregados o áridos), agua y eventualmente aditivos, que al endurecerse forma un todo compacto (piedra artificial) y después de cierto tiempo es capaz de soportar grandes esfuerzos de compresión.

### 6.2.5 Características y funciones de los componentes

#### 6.2.5.1 Cemento

El cemento se utiliza, como ya se mencionó, es cemento portland hidráulico, el cual tiene propiedades tanto adhesivas como cohesivas, que le dan capacidad de aglutinar los agregados o áridos para conformar el concreto. Estas propiedades dependen de su composición química, el grado de hidratación, la finura de las partículas, la velocidad de fraguado, el calor de hidratación y la resistencia mecánica que es capaz de desarrollar.

#### 6.2.5.2 Agua

La razón de que los cementos sean hidráulicos es que estos tienen la propiedad de fraguar y endurecer con el agua, en virtud de que experimentan una reacción química con ella, de tal manera que el agua como material dentro del concreto es el elemento que hidrata las partículas de cemento y hace que estas desarrollen sus propiedades aglutinantes.

Al mezclarse el agua con el cemento se produce la pasta, la cual puede ser más o menos diluida, según la cantidad de agua que se agregue. Al endurecer la pasta, como consecuencia del fraguado, parte del agua queda fija (agua de hidratación) en la estructura rígida de la pasta y el resto queda como agua evaporable.

#### 6.2.5.3 Aire

Cuando el concreto se encuentra en proceso de mezclado, es normal que quede aire incluido dentro de la masa (aire naturalmente atrapado), el cual es posteriormente liberado por los procesos de compactación a que es sometido el concreto una vez ha sido colocado. Sin embargo, como la compactación no es perfecta, queda siempre un aire residual dentro de la masa endurecida. Por otra parte, en algunas ocasiones se incluyen burbujas de aire, por medio de aditivos, con fines específicos.

#### 6.2.5.4 Aditivos

En términos de función, estos pueden ser reductores de agua, retardantes o acelerantes. Hay algunos otros, como los inclusores de aire, las puzolanas, los colorantes, etc.

En cuanto a las funciones de los aditivos, estos pueden ser utilizados para modificar las propiedades del concreto de manera que lo hagan más adecuado para las condiciones de trabajo. Pero, también pueden ser usados por razones de orden económico, ya que permiten, en algunos casos, reducir los costos de fabricación del concreto. (Sánchez, 2001, p.65)

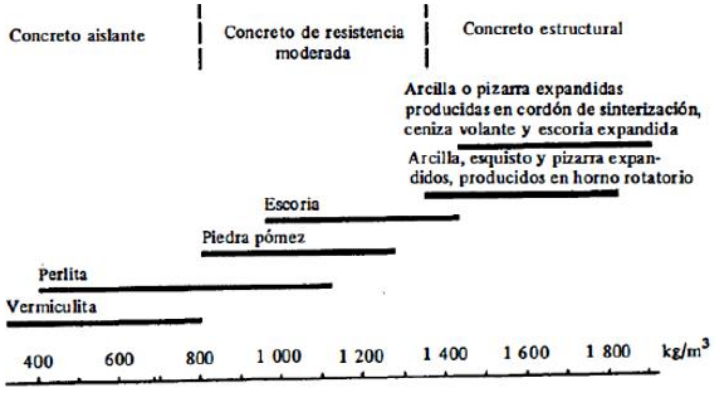
En la búsqueda por implementar nuevas materias primas a la fabricación de concreto y optimizar los procesos de producción de este, así como integrar una política de responsabilidad empresarial con el medio ambiente. Se ha establecido que el concreto ligero puede dar continuidad al desarrollo de un material menos denso, con una resistencia a la compresión menor pero que conserva las mismas especificaciones que requiere la industria de la construcción.

### 6.2.6 Concreto liviano

Los concretos de peso normal suelen tener densidades que oscilan entre los 2200 a 2600 $kg/m^3$ gracias a que los agregados generalmente utilizados no varían drásticamente su peso volumétrico, debido a que los concretos de peso liviano si presentan altas variaciones en cuanto a esta propiedad, es necesario caracterizar con precisión al material.

Los concretos de peso liviano se diferencian principalmente de los concretos normales principalmente porque tienen menor densidad y mantienen una resistencia a la compresión dentro de los estándares para considerarlos estructurales, es decir, valores superiores a los 17.5 MPa (Límite mínimo para considerar a un concreto de peso liviano cómo estructural).

*Gráfico 1.* ***Densidades de concretos de peso liviano, teniendo en cuenta el material de fabricación***




*Tomado de Neville. Adam. Tecnología del concreto. 1 ed. México D.F. Instituto Mexicano del cemento y del concreto A.C. 1999. 484 p*

### 6.2.6.1 Ventajas del concreto de peso liviano

Teniendo en cuenta la diferencia de densidad entre un concreto de peso normal y uno liviano, podemos mencionar algunas de sus ventajas al ser utilizado cómo material de construcción.

• Se reducen los desechos generados para obtener materiales de construcción ya que estos son utilizados para la fabricación de concretos de peso liviano cómo la piedra pómez, perlita, vermiculita, cenizas volcánicas, escorias de alto horno, desperdicios industriales, entre otros.

• Es un material que puede ser utilizado en construcciones que no requieran una alta resistencia a la compresión; como por ejemplo viviendas de uno y dos pisos, escuelas, edificios pequeños, y estructuras en general que no tengan que soportar cargas de gran magnitud.

• Al utilizar concreto aligerado en la construcción de una estructura esta reduce su peso considerablemente, disminuyendo las cargas muertas.

• Reducción considerable en el tamaño de la cimentación. La estructura al tener un menor peso transmite una menor cantidad de cargas al suelo.

• El material funciona perfectamente como aislante acústico y térmico gracias a su baja conductividad, permitiendo satisfacer estas necesidades en las situaciones que se presenten.

• La constante investigación a nivel mundial, ha permitido el desarrollo de métodos industriales económicos para producir concreto aligerado a bajo costo, llegando a competir en el mercado con concretos de peso normal.

• La utilización de prefabricados hechos a partir de concretos de peso liviano, en la fabricación de viviendas permite su fácil y rápida construcción.

• Permite la construcción de más pisos en una edificación existente, sin tener que modificar sus cimientos o alterar la manera en la que distribuye las cargas al suelo.

• El concreto de peso liviano puede alcanzar resistencias a la compresión similares a las de un concreto normal, por lo que podría tenerse en cuenta como una opción al momento de construir.

• Debido a la mayor cantidad de aire incluido en su masa, el concreto de peso liviano ofrece una resistencia contra el fuego 20 a 50% superior que la disponible en un concreto normal.

• El uso de concreto de peso liviano permite la construcción en terrenos con una menor capacidad portante.

#### 6.2.6.2 Desventajas del concreto de peso liviano

Conociendo las ventajas de este material es necesario mencionar sus desventajas más representativas:

• Los agregados livianos presentan una menor resistencia a la compresión, lo que influye considerablemente en la resistencia máxima lograda a los 28 días por una mezcla de concreto fabricada a partir de este material.

• Cómo el módulo de elasticidad de los concretos livianos es considerablemente más reducido que el de los concretos de peso normal, este presenta deformaciones mayores.

• La trabajabilidad de los concretos de peso liviano debe mejorarse debido a la alta absorción de agua de los agregados porosos, por lo que se requiere de aditivos plastificantes, o incluso el aumento de la relación agua cemento de la mezcla.

• El concreto armado de peso liviano es mucho más susceptible a los procesos de corrosión a causa de su alta porosidad la cual posibilita la absorción excesiva en el material.

• En ocasiones la selección de la relación agua cemento en el diseño de la mezcla de concreto liviano debe realizarse a prueba y error tomando como referencia la resistencia alcanzada por mezclas realizadas con anterioridad. (Neville, 1999, p.485)

***Gráfico 2. Propiedades típicas de concretos de peso ligero comunes***

| Tipo de concreto | | Densidad aparente del agregado | Densidad seca del concreto | Resistencia a la compresión a 28 días | Contracción por secado, $10^{-6}$ | Conductividad térmica |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | kg/m$^3$ | kg/m$^3$ | MPa | | Jm/m$^2$s°C |
| Escoria expandida | Fina | 900 | 1850 | 21 | 500 | 0.69 |
| | Gruesa | 650 | 2100 | 41 | 600 | 0.76 |
| Arcilla expandida de horno de calcinación rotatorio | Fina | 700 | 1200 | 17 | 600 | 0.38 |
| | Gruesa | 400 | 1300 | 20 | 700 | 0.40 |
| Arcilla expandida de cordón de sinterización | Gruesa | 400 | 1500 | 20 | -- | 0.57 |
| | | | 1600 | 35 | -- | -- |
| | | | 1750 | 50 | -- | -- |
| | | | 1900* | 70† | -- | -- |
| Arcilla expandida de filamento de toba | Fina | 1050 | 1500 | 25 | 600 | 0.55 |
| | Gruesa | 650 | 1600 | 30 | 750 | 0.61 |
| Pizarra expandida de horno de calcinación rotatorio | Fina | 950 | 1700 | 28 | 400 | 0.61 |
| | Gruesa | 700 | 1750 | 35 | 450 | 0.69 |
| Ceniza volante sinterizada | Fina | 050 | 1500 | 25 | 300 | -- |
| | Gruesa | 800 | 1540 | 30 | 350 | -- |
| | | | 1570 | 40 | 400 | -- |
| Ceniza volante sinterizada con arena natural | Gruesa | 800 | 1700 | 25 | 300 | -- |
| | | | 1750 | 30 | 350 | -- |
| | | | 1790 | 40 | 400 | -- |
| Piedra pómez | | 500-800 | 1200 | 15 | 1200 | -- |
| | | | 1250 | 20 | 1000 | 0.14 |
| | | | 1450 | 30 | -- | -- |
| Perlita | | 40-200 | 400-500 | 1.2-3 | 2000 | 0.05 |
| Vermiculita | | 60-200 | 300-700 | 0.3-3 | 3000 | 0.10 |
| Celular | Ceniza volante | 950 | 750 | 3 | 700 | 0.19 |
| | Arena | 1600 | 900 | 6 | | 0.22 |
| Aireada en autoclave | | -- | 800 | 4 | 800 | 0.25 |

*Con ceniza volante y humo de sílice
† A un año

***Tomado de Neville. Adam. Tecnología del concreto. 1 ed. México D.F. Instituto Mexicano del cemento y del concreto A.C. 1999. 483 p***

### 6.2.6.3 Agregados utilizados en la fabricación de concreto liviano

**Piedra pómez o pumicita**

La piedra pómez es un vidrio volcánico de color claro, como espuma, con una densidad aparente en el rango de 500 a 900 kg/m$^3$. Aquellas variedades de piedra pómez que no son demasiado débiles estructuralmente hacen un concreto satisfactorio con una densidad de 800 kg/m³ a 1800 kg/m³ con buenas características de aislamiento, pero que tienen alta absorción y contracción.

**Diatomita**

Es un agregado liviano proveniente de la fosilización de esqueletos de plantas acuáticas microscópicas llamadas diatomeas.

La diatomita es de color blanco presenta estructura laminar, poros y se desmenuza fácilmente. Cuando se encuentra pura (libre de arena y arcilla) tiene una densidad de 450 $kg/m^3$. Los concretos fabricados con este agregado tienen alto poder aislante siendo empleados en hornos de altas temperaturas.

**Escoria volcánica**

Roca vidriosa vesicular, de color oscuro (pardo y rojizo), con estructura de poros muy grandes y variables los cuales no se encuentran conectados entre sí, con un peso volumétrico comprendido entre 700 kg/m³ y 1500 kg/m³.

Sus resistencias son mejores que las de la piedra pómez, debido a su estructura interna; los concretos fabricados con este tipo de agregado presentan menor absorción de agua y por lo tanto menor retracción.

**Pizarra, esquisto y arcilla expandida**

Estos materiales son sometidos a temperaturas de entre los 1200 °C a 1400 °C en hornos rotatorios, los cuales hacen que el material duplique su volumen a través de vapores que quedan atrapados en su masa viscosa generando poros que se conservan en estado frío, de tal manera que su peso específico es muy inferior al original.

La pizarra o la arcilla expandida son agregados con forma de bolitas porosas, redondeadas y medianamente compactas, su densidad se encuentra entre los 300 kg/m³ y 650 kg/m³ tienen una estructura microporosa, resistente químicamente estable, con alta resistencia al fuego, siendo buenos aislantes térmicos y acústicos.

Los concretos producidos con este tipo de materiales presentan altas resistencias, densidades entre los 1400 kg/m³ y los 1800 kg/m³.

**Ladrillo triturado**

Este agregado liviano se utiliza en la fabricación de concretos de baja resistencia, los cuales son buenos aislantes térmicos, presentan baja retracción y módulo de elasticidad.

Son agregados alternativos extraídos de construcciones demoliciones o desperdicios de fábricas de ladrillos.

**Vermiculita o mica esponjada**

La vermiculita es un mineral del grupo de los silicatos, que al ser sometido a temperaturas de entre los 650 °C a 1000°C, puede aumentar su tamaño hasta 60 veces, siendo su densidad de tan solo 60 kg/m³ a 130 $kg/m^3$ el concreto producido con este agregado presenta muy bajas resistencias, pero funciona muy bien cómo aislante térmico.

**Perlita expandida**

Roca volcánica vidriosa que en estado natural presenta una densidad mucho mayor a la de la piedra pómez a causa de que no tiene una estructura porosa. Sin embargo, al ser sometida a temperaturas entre 900 °C a 1100°C, se expande formando un material celular liviano con densidades de 30 kg/m³ a 240 kg/m³.

Los concretos fabricados con perlita tienen resistencias muy bajas y alto grado de contracción, por lo que se usan como aislantes, agregados para fabricación de bloques y muros, además de protección contra el fuego. Estos concretos secan muy rápidamente permitiendo dar acabado de inmediato.

**Escoria de alto horno**

La escoria de alto horno se produce a través de la adición de agua, en donde en un horno a altas temperaturas, se funde y luego se expande gracias al vapor de agua y vapor de componentes químicos presentes en el material. Su peso volumétrico a granel oscila entre los 600 kg/m³ a 900 kg/m³.

Los concretos producidos con escoria alcanzan resistencias bajas y contracciones medias.

**Escoria de hulla**

Se compone por el fundido y la sinterización de residuos bien quemados de los procesos de combustión de hornos industriales a altas temperaturas en donde se usa la hulla como combustible. La escoria de hulla se forma por su contenido de minerales cómo calcitas, caolinitas y piritas. Se deben usar escorias duras y libres de cenizas para la producción de concreto. El contenido de sales presentes en este tipo de material puede producir corrosión en el acero de refuerzo, por lo que se recomienda que sea menor al 1%. Los concretos fabricados a partir de escoria de hulla se caracterizan por tener densidades entre 1000 kg/m³ y 1500 kg/m³ resistencias medias a bajas, y usos cómo elementos aislantes y rellenos.

**Cenizas industriales**

Las cenizas, residuos de la quema de carbón el cual es utilizado para producir energía eléctrica, son molidas, humedecidas y por último transformadas en partículas redondeadas en un horno adecuado. Los concretos fabricados a partir de este material tienen densidades y resistencias altas, por lo que son utilizados en elementos estructurales. (Neville, 1999, p.485)

#### 6.2.6.4 Agregados orgánicos

Son materiales que sometidos a procesos que evitan su descomposición, se utilizan en la mezcla de concretos livianos gracias a su baja densidad; algunos de los agregados orgánicos más representativos son:

**Cascarilla de arroz**

Residuo de arroceras, el cual tiene un bajo poder nutritivo, y elevado porcentaje de sílice (aproximadamente el 18%), por lo que no es apto para consumo humano. La forma aconchada de la cascarilla de arroz permite que se atrape aire, aligerando la masa de concreto. Por otra parte, su contenido de sílice hace que las partículas presenten un aspecto petrificado, que es compatible con la composición química del cemento. Se debe remover su aceite natural al aplicar una lechada de cal, para mejorar su adherencia con la pasta de cemento, y evitar la absorción del agua de mezclado reduciendo los cambios bruscos de humedad y disminución de la retracción.

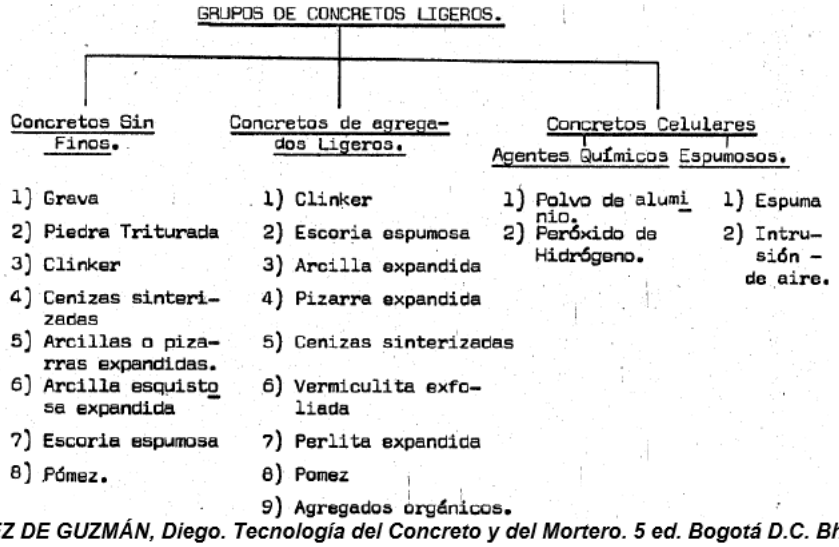
**Viruta de madera**

Es el agregado vegetal más ampliamente usado en la fabricación de concreto liviano. La viruta en astillas debe ser sometida a un tratamiento antes de ser utilizada como agregado. Este tratamiento consiste en una mineralización por inmersión de la viruta en una lechada de cal, lechada de cemento, silicato o cloruro potásicos para mejorar su resistencia y evitar su putrefacción. Las mezclas de concreto producidas con este material alcanzan resistencias muy bajas, siendo su principal uso como división o aislamiento térmico y acústico.

**Styropor o icopor**

Compuesto por resinas espumosas de poliéster. Se obtiene a partir del poliestireno como agente de expansión incorporado, cuyas perlas esféricas y vítreas se expanden al ser calentadas por vapor. Una vez expandidas las perlas tienen una densidad aproximada de 12 kg/m³. El concreto aligerado con icopor se obtiene mediante el mezclado de estas perlas expandidas de poliestireno con cemento, arena y agua, llegando a ocupar el icopor entre el 60 y 70% del peso total. Las principales aplicaciones son como morteros aislantes, fabricación de bloques y elementos prefabricados para aligerar cargas.

***Gráfico 3. Grupos de concretos ligeros***




*Tomado de SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. Tecnología del Concreto y del Mortero. 5 ed. Bogotá D.C. Bhandar editores LTDA. 2001, 224 p*

### 6.2.7 DISEÑO DE MEZCLA

Como se ha visto a lo largo de nuestra formación académica, el concreto está compuesto de cemento, agregados finos y gruesos, alguna cantidad de aire naturalmente atrapado o intencionalmente incluido y eventualmente aditivos.

El principal componente del concreto es el cemento, el cual ocupa entre el 7% y el 15% del volumen de la mezcla y tiene propiedades de adherencia y cohesión. El cemento es producido por el hombre y proviene de la calcinación de rocas calizas y arcilla. El segundo componente, los agregados, ocupan entre el 59% y el 76% del volumen de la mezcla. Son esencialmente materiales inertes, de forma granular, naturales o artificiales, que por conveniencia has sido separados en fracciones finas (arenas) y fracciones gruesas (gravas). En general, provienen de las rocas naturales. El tercer componente es el agua, ocupa entre el 14% y el 18% del volumen de la mezcla e hidrata al cemento por medio de complejas reacciones químicas. Adicionalmente, el concreto también contiene alguna cantidad de aire atrapado (usualmente entre el 1% y 3% del volumen de la mezcla y puede contener aire incluido intencionalmente (entre el 1% y 7% del volumen de la mezcla) lo cual se logra con el uso de aditivos o con cementos que tengan agentes inclusores de aire.

Finalmente, con alguna frecuencia se añaden aditivos a la mezcla con el objeto de mejorar una o más propiedades del concreto, tales como acelerar, retardar, mejorar trabajabilidad, reducir requerimientos de agua, incrementar resistencia, o alterar otras propiedades. (Sánchez. 2001, p.221)

El proporcionamiento de mezclas de concreto o “Diseño de mezclas”, es un proceso que consiste en la selección de los ingredientes disponibles (cemento, agregados, agua y aditivos) y la determinación de sus cantidades relativas para producir, tan económicamente como sea posible, concreto con el grado requerido de manejabilidad, que al endurecer a la velocidad apropiada adquiera las propiedades de resistencia, durabilidad, peso unitario, estabilidad de volumen y apariencia adecuadas.

Estas proporciones dependen de las propiedades y características de los ingredientes usados, de las propiedades particulares del concreto especificado y de las condiciones particulares bajo las cuales el concreto será producido y colocado.

Aunque hoy en día existen diversos métodos de diseño disponibles, y ellos dan aproximadamente las mismas proporciones relativas de materiales, probablemente el método más común y utilizado en Norte América y muchos países, entre los cuales se incluye Colombia, es la “PRACTICA RECOMENDABLE PARA DOSIFICAR CONCRETO NORMAL Y CONCRETO PESADO A.C.I – 211”.

Para Neville (1981) citado por Sánchez (2001, p.222) sostiene que: Las propiedades requeridas del concreto fresco están regidas por el uso al que estará destinado el concreto (tipo de construcción) y por las condiciones esperadas en el momento de su colocación (técnicas de vaciado y transporte); y, de otra parte, las propiedades en estado endurecido quedan especificadas por el proyectista de la estructura para las condiciones de servicio y exposición a que quedará sometida. Estos dos aspectos son los que en principio facultan al ingeniero para determinar las propiedades de la mezcla, teniendo en cuenta, además el grado de control que se ejercerá en la obra, el cual es

definitivo para la determinación de la resistencia de diseño de la mezcla. Sin embargo, hay tres consideraciones básicas que deben ser contempladas por quién está diseñando la mezcla: Economía, especificaciones y tecnología existente en el sitio de producción.

**Economía**

La primera consideración que debe ser estudiada después de los aspectos técnicos y de seguridad en un diseño de mezcla, es la factibilidad económica de su producción, lo cual es sin duda alguna uno de los requisitos más comunes de la ingeniería. El costo de producción del concreto, como el de cualquier material de construcción, está constituido por le consto de los materiales (cemento, agregados, agua y aditivos), la mano de obra, los equipos utilizados (planta y otros), y el grado de control de calidad que se adelante en el sitio de trabajo. Por ello, debido a que el cemento, por lo general es el más costo de los materiales que constituyen el concreto, uno de los objetivos del diseño de mezclas es minimizar su contenido para reducir los costos del concreto. Por otra parte, es conveniente tener presente que aparte del aspecto económico, un alto contenido de cemento puede ser contraproducente, no solamente en el caso de concretos masivos, donde se desarrolla un alto calor de hidratación que genera grietas, sino también en estructuras convencionales donde a mayor contenido de cemento mayor es la probabilidad de contracción y fisuramiento.

De acuerdo con Mindess y Young (1981) citado por Sánchez (2001, p.222) “esto puede, en general, ser conseguido al usar el más bajo asentamiento que permita una adecuada colocación, al emplear el más grande y práctico tamaño máximo de agregado, al utilizar la óptima relación de agregados gruesos y finos, y cuando sea necesario, usando aditivos apropiados. Adicionalmente,

el uso de mezclas comparativamente pobres confiere también considerables ventajas técnicas; la contracción en general será reducida y habrá menos calor de hidratación".

**Especificaciones**

Por lo general cada proyecto tiene requerimientos particulares que dependen del tipo de estructura, condiciones de clima, sistema constructivo, tiempo y costos de ejecución, entre otros, que pueden abarcar una gran gama de propiedades y características del concreto, Frecuentemente, las especificaciones pueden solicitar algunos de los siguientes aspectos:

**a.** Máximo y/o mínimo asentamiento.

**b.** Tamaño máximo y/o máximo nominal del agregado grueso.

**c.** Contenido mínimo de aire incluido, para dar adecuada durabilidad en ciertos climas.

**d.** Resistencia a la compresión mínima necesaria, por consideraciones estructurales.

**e.** Resistencia mínima de sobre diseño.

**f.** Máxima relación agua-cemento y/o contenido mínimo de cemento.

**g.** Máximo contenido de cemento para evitar agrietamiento por exceso de temperatura en concreto masivo.

**h.** Máximo contenido de cemento, para evitar agrietamiento por contracción en condiciones de baja humedad.

**i.** Tipos especiales de cemento o agregados.

**j.** Peso unitario mínimo, para presas de gravedad y estructuras similares.

**k.** Uso de aditivos.

**Tecnología existente**

El otro aspecto que deber ser considerado por el diseñador de la mezcla, es la tecnología existente en el sitio de obra para producir el concreto, debido al hecho de que hay diferentes sistemas de dosificación, mezclado, transporte, colocación y curado, que tienen influencia sobre las propiedades del concreto.

En obras pequeñas (75 $m^3$ o menos), con sistemas rudimentarios de producción, la forma más común de medir las proporciones de una mezcla de concreto es en relación con el peso de los materiales empleados, tomando como unidad el cemento (no por volumen, como se tiene tendencia a considerar). Para evitar confusiones, cuando hay varias clases de agregados finos y gruesos, es conveniente colocar las proporciones en orden ascendente de tamaño (primero la arena con módulo de finura menor y por último el agregado grueso de tamaño mayor). Además de lo anterior, se considera conveniente colocar antes de la unidad el valor del peso de agua, o sea, la relación agua-cemento.

Es importante insistir en que la dosificación del cemento y los agregados siempre debe hacerse por peso, pues la medida de estos o cualquier otro sólido con base en su volumen puede conducir a grandes errores al no tenerse en cuenta el grado de compactación o abultamiento de las partículas, el grado de saturación o humedad de los agregados, ni el volumen absoluto de cada ingrediente en el momento de la dosificación. Por ello, sólo el agua y los aditivos líquidos pueden ser medidos con precisión, con base en el volumen.

Por lo anterior, en obras de mayor tamaño, el diseño siempre se estipula en peso seco de cada material; y la dosificación, en peso seco para el cemento y en peso húmedo de cada agregado, por

metro cúbico de concreto. Adicionalmente, como los agregados generalmente se comercializan y transportan por volumen suelto, pero se dosifican por peso, se deber hacer la conversión correspondiente, utilizando las masas unitarias sueltas de cada material. (Sánchez, 2001, p.224)

**Información requerida de los materiales**

De acuerdo con el A.C.I – 211, en la medida de lo posible, la selección de las proporciones de una mezcla de concreto debe estar basada en datos de ensayo (propiedades de los materiales) o experiencia con los materiales que realmente se van a utilizar.

**Propiedades del cemento**

En el caso del cemento, no sólo basta su conformidad con las normas. Pues debido a que hoy en día hay muchas clases y tipos de cemento disponibles, es importante conocer las propiedades y características de cada uno de los cementos que eventualmente van a ser empleados en el sitio de trabajo, y especialmente cuando varias marcas diferentes van a ser utilizadas al mismo tiempo.

Esta información debe incluir como mínimo los siguientes datos:

**a.** Peso especifico

**b.** Superficie especifica.

**c.** Consistencia normal y tiempos de fraguado.

**d.** Expansión por autoclave.

**e.** Resistencia a la compresión a 1, 3, 7, 14 y 56 o 90 días de edad.

**f.** Composición química.

## Calidad del agua

El agua de mezclado debe cumplir con las tolerancias y concentraciones máximas de impurezas, además de los criterios físicos y mecánicos de aceptación con respecto a los tiempos de fraguado y a la resistencia del concreto producido con ella.

***Tabla 3. Criterios de aceptación para ensayos de la calidad del agua***

| Ensayo | Límites | Norma |
|---|---|---|
| Desviación de los tiempos de fraguado con respecto al testigo (hr:min) | No más temprano de 1:00, ni más tarde de 1:30 | Icontec 118 |
| Resistencia mínima a los 7 días de edad con respecto al testigo | 90% | Icontec 220 |

***Fuente: Tomado de SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. Tecnología del Concreto y del Mortero. 5 ed. Bogotá D.C. Bhandar editores LTDA. 2001***

## Propiedades de los agregados

Debido a que el concreto está constituido en su mayor parte por agregados (70% o más en volumen), estos no son menos importantes que la pasta de cemento.

Por el contrario, gran parte de las propiedades del concreto, tango en estado plástico como en estado endurecido, dependen de las características y propiedades de los agregados. Por esta razón, la siguiente información es importante

**a.** Origen y propiedades petrográficas y mineralógicas.

**b.** Análisis granulométrico.

**c.** Forma y textura superficial de las partículas.

**d.** Peso específico aparente.

**e.** Capacidad de absorción de agua.

**f.** Contenido natural de humedad.

**g.** Masas unitarias.

**h.** Contenido de finos y sustancias perjudiciales.

**Características de los aditivos**

En cuanto a los aditivos, el fabricante y las pruebas desarrolladas con ellos deben proveer la siguiente información para establecer su "compatibilidad" con el cemento y los materiales empleados, y su eficiencia de la mezcla de concreto: (Sánchez, 2001, p.225)

**a.** Capacidad de reducción de agua.

**b.** Efecto sobre la manejabilidad, cohesión y plasticidad.

**c.** Efecto sobre la pérdida de asentamiento.

**d.** Inclusión de aire.

**e.** Efecto sobre el calor de hidratación.

**f.** Efecto sobre la velocidad de fraguado.

**g.** Efecto sobre exudación del concreto.

**h.** Efecto sobe la contracción, resistencia, durabilidad y otras propiedades del concreto.

#### 6.2.7.1 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

Utilizando la metodología seguida por el Comité A.C.I – 211, la determinación de las proporciones de cada ingrediente por metro cúbico de concreto es obtenida siguiendo una secuencia o serie de pasos a seguir para establecer cada fase dentro de un diseño de mezcla. Sin embargo, antes de iniciar el procedimiento, se hace hincapié en que un diseño, en el sentido estricto de la palabra, no es posible, debido a que los materiales son esencialmente variables y muchas de sus propiedades no pueden ser tasadas con exactitud en forma cuantitativa. Por tal motivo, es necesario hacer mezclas de prueba para revidar y ajustar las proporciones de los materiales.

Se concluye que el procedimiento de diseño de mezclas se basa en el método de "ensayo y error", en este caso converge rápidamente con el sistema de "ajuste y reajuste". Sin embargo, las variaciones propuestas por la bibliografía consultada es una adaptación hecha al medio colombiano, la cual busca reducir el número de mezclas de prueba ahorrando tiempo y dinero. El procedimiento recomendado, paso a paso, es el indicado a continuación:

**1.** Selección del asentamiento.

**2.** Selección del tamaño máximo del agregado.

**3.** Estimación del contenido de aire.

**4.** Estimación del contenido de agua de mezclado.

**5.** Determinación de la resistencia de diseño.

**6.** Selección de la relación agua-cemento.

**7.** Cálculo del contenido de cemento.

**8.** Estimación de las proporciones de agregados.

**9.** Ajuste por humedad de los agregados.

**10.** Ajustes a las mezclas de prueba.

**Selección del asentamiento**

Como se ha visto a lo largo de nuestra formación académica, las propiedades del concreto en estado fresco (para manejarlo, colocarlo y compactarlo) son importantes, debido a que de ella dependen en gran parte las propiedades en estado endurecido. Las primeras consideraciones que se deben tomar en cuenta para especificar una consistencia determinada en el concreto fresco son el tamaño de la sección que se va a construir, la cantidad y espaciamiento del acero de refuerzo. Es claro que cuando la sección es estrecha y complicada, o cuando hay numerosas esquinas o partes inaccesibles, el concreto debe tener una alta manejabilidad, de modo que pueda lograrse la mejor compactación posible con una cantidad razonable de esfuerzo. El segundo aspecto que se debe considerar son las condiciones de colocación, ya que hoy en día existen múltiples sistemas de vaciado como el bombeo, las bandas transportadoras, el tubo-embudo Tremie, las pavimentadoras, entre otros que requieren de una mayor o menor plasticidad (cohesión) de la mezcla, lo cual, como es sabido, depende en gran parte del contenido de finos. El tercer aspecto es el sistema de compactación, debido a que la máxima resistencia se logra cuando la masa unitaria del concreto (con agregados pétreos de peso normal) es máxima.

Sin embargo, si la consistencia en términos de asentamiento no se ha especificado con anterioridad, la siguiente tabla N° 4 provee una guía empírica de la consistencia requerida por el concreto para diferentes tipos de construcción, sistemas de colocación y de compactación. Los valores de asentamiento indicados en la tabla N° 4 se aplican cuando el concreto va a ser consolidado por vibración. Si se emplean otros medios de compactación diferentes a la vibración

mecánica, los datos se deben aumentar en 25 mm. Como regla general y por razones de economía, el menor asentamiento que permita una adecuada colocación es el que debe ser seleccionado. (Sánchez, 2001, p.227)

Tabla 4. ***Asentamientos recomendados para diversos tipos de construcción y sistemas de colocación y*** compactación

| 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 (lanzados) | 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 operadoas manualmente | Secciones simplemente reforzadas, con vibración |
| Media | 50-100 | Pavimentos compactados a mano, lozas 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) |

***Fuente: Tomado de SÁNCHEZ, Diego: Practical Method for Design Mixes of Normal Weight Concrete – Based on A.C.I 211.1***

**Selección del tamaño máximo del agregado**

De acuerdo con el criterio del A.C.I 211, los agregados bien gradados con mayor tamaño máximo tienen menos vacíos y menor área superficial que los de menor tamaño máximo; por consiguiente, si el tamaño máximo de los agregados en una mezcla de concreto se aumenta (para un mismo asentamiento), los contenidos de cemento y agua disminuirán. Por lo tanto, el tamaño máximo del agregado deberá ser el mayor económicamente disponible y compatible con las dimensiones de la estructura.

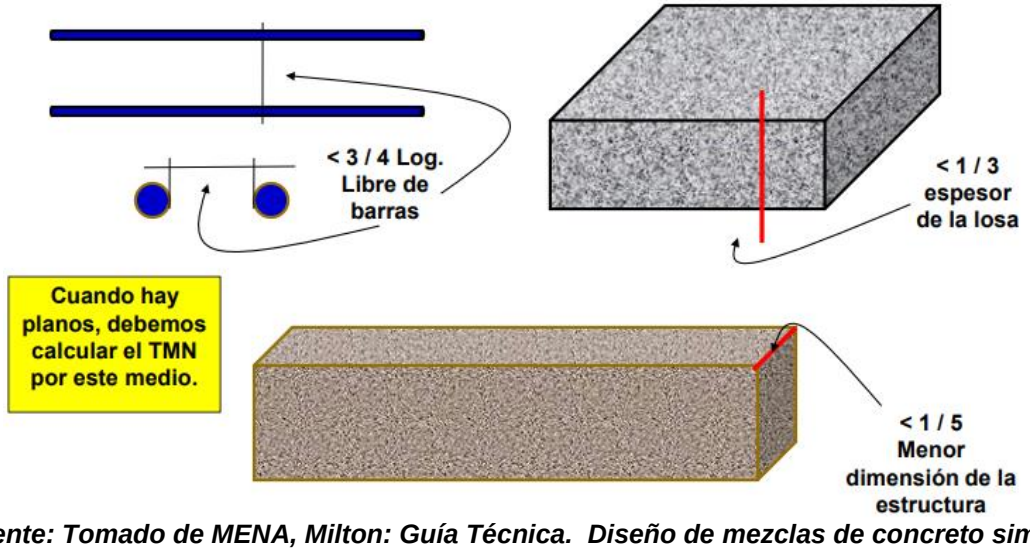
Para las estructuras convencionales de concreto que constituyen la mayoría de los casos, con frecuencia se aplican las recomendaciones de la Norma Sismorresistente NSR 2010. Según esta, el tamaño máximo nominal del agregado no debe exceder de las siguientes dimensiones:

**a.** La quinta parte de la separación mínima entre lados de la cimbra.

**b.** Las tres cuartas partes del espaciamiento libre mínimo entre varillas o alambres individuales, torones o ductos de refuerzo, lotes de varillas o entre el acero y la formaleta.

**c.** La tercera parte del espesor, en el caso de losas.

***Criterios para seleccionar el tamaño máximo nominal para diseño de mezclas de concreto*** hidráulico




***Fuente: Tomado de MENA, Milton: Guía Técnica. Diseño de mezclas de concreto simple hidráulico de peso normal. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.***

***Tabla 5. Tamaños máximos del agregado según tipo de construcción***

| Tamaño máximos de agregados según el tipo de construcción | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Dimensión mínima de la seccion (cm) | Tamaño máximo en pulg (mm) | | | |
| | Muros reforzados vigas y columnas | Muros sin refuerzo | Losas muy reforzadas | Losas sin refuerzo o poco reforzadas |
| 6 - 15 | 1/2 (12) - 3/4 (19) | 3/4 (19) | 3/4 (19) - 1 (25) | 3/4 (19) - 1 1/2 (38) |
| 19 - 29 | 3/4 (19) - 1 1/2 | 1 1/2 (38) | 1 1/2 (38) | 1 1/2 (38) - 3 (76) |
| 30 - 74 | 1 1/2 (38) - 3 (76) | 3 (76) | 1 1/2 (38) - 3 (76) | 3 (76) |
| 75 o más | 1 1/2 (38) - 3 (76) | 6 (152) | 1 1/2 (38) - 3 (76) | 3 (76) - 6 (152) |

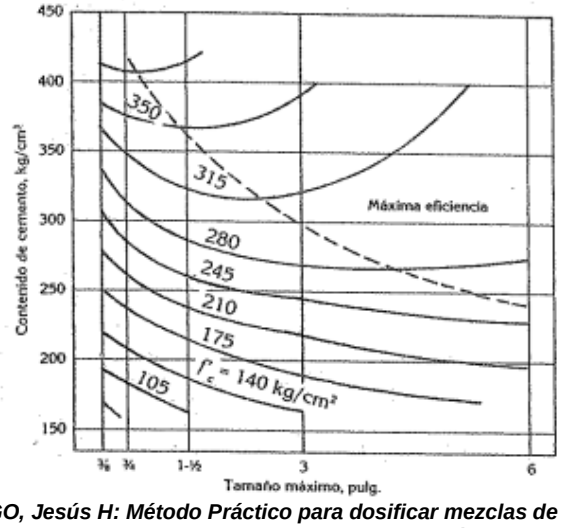
***Fuente: Tomado de SÁNCHEZ, Diego: Practical Method for Design Mixes of Normal Weight Concrete – Based on A.C.I 211***

Respecto de la producción, Mena (1984), citado por Sánchez, (2001, p.229) añade: "otro aspecto que puede contribuir a limitar el tamaño máximo es el equipo disponible para mezclar el concreto. Algunos tipos de mezcladoras, como las de descarga libre, pueden revolver y descargar eficientemente concretos con diversos tamaños máximos de grava hasta de 152 mm (6"); pero otros, como las de mezcla forzada, están diseñados específicamente para concretos con gravas de poco tamaño máximo y no mayor de 38,1 mm (1 ½").

En cuanto a la colocación, el uso de bombas de concreto y bandas transportadoras puede ocasionar ciertas limitaciones. "En el caso de concreto bombeado, el tamaño del agregado grueso se limita de acuerdo con el diámetro interior de la tubería de conducción. Según el criterio del comité A.C.I – 304, el tamaño máximo puede llegar a representar hasta el 40% del diámetro de la tubería cuando los agregados tienen formas bien redondeadas, mientras que con agregados angulares deben restringirse a una tercera parte del diámetro. Sin embargo, para reducir el riesgo de obstrucciones en la tubería, en la práctica se tiende a limitar el tamaño máximo a una cuarta parte del diámetro. De esta manera, considerando que los diámetros más comunes en las tuberías comerciales están entre 100 y 150 mm, resulta que en el concreto de bombeo se utilizan agregados cuyo tamaño máximo fluctúa entre 19 mm (3/4") y 38 (1 ½"), con motivo de esta limitación.

En el gráfico 4 las curvas muestran que, para diversos contenidos mínimos de cemento, la resistencia a la compresión es inversamente proporcional al tamaño máximo del agregado y que, en rangos de resistencia bajos, la medida del agregado es de menor importancia que en rangos de resistencia altos. Igualmente, se observa que los concretos con el menor tamaño de agregado generalmente desarrollan las resistencias más altas.

***Gráfico 4. Influencia del tamaño máximo en la resistencia***




***Fuente: Tomado de ARANGO, Jesús H: Método Práctico para dosificar mezclas de concreto, Instituto Colombiano de Productores de Cemento, ICPC, Notas Técnicas N°12***

**Estimación del contenido de aire**

Durante la operación de mezclado queda aire naturalmente atrapado dentro del concreto. Pero cuando se prevea que habrá condiciones de exposición severa, es conveniente incluir aire en el concreto. Bajo estas condiciones de ciclos de congelamiento y deshielo los comités 211 y 318 del A.C.I, indican las cantidades aproximadas de aire atrapado que pueden ser esperadas en concreto sin aire incluido, y los niveles recomendados de aire intencionalmente incluido para diferentes tamaños de agregado, y para los diferentes niveles de exposición.

Para la interpretación de estos niveles de exposición, el comité A.C.I – 211 contempla las siguientes definiciones:

**Exposición ligera:** Cuando se desee la inclusión de aire por otros efectos benéficos que no sean la durabilidad, por ejemplo, para mejorar la cohesión o trabajabilidad, o para incrementar la resistencia del concreto con bajo contenido de cemento, pueden emplearse contenidos de aire inferiores a los necesarios para la durabilidad. Esta exposición incluye servicio interior o exterior en climas en los que el concreto no estará expuesto a agentes de congelación o deshielo.

**Exposición moderada:** Implica servicio en climas donde es probable la congelación, pero en los que el concreto no estará expuesto continuamente a la humedad o al agua corriente durante largos periodos antes de la congelación, ni a agentes descongelantes u otros productos químicos agresivos. Como ejemplos pueden señalarse: vigas exteriores, columnas, muros trabes o losas que no estén en contacto con el terreno húmedo y que están ubicadas de manera que no reciban aplicaciones directas de sales descongelantes.

**Exposición severa:** El concreto expuesto a productos químicos descongelantes u otros agentes agresivos, o bien, cuando el concreto puede resultar altamente saturado por el contacto continuo con humedad o agua corriente antes de la congelación. Ejemplos de lo anterior son: pavimentos, pisos de puentes, guarniciones, desagües, aceras, revestimiento de canales, tanques exteriores para agua o resumideros.

Sin embargo, para efectos prácticos, se sugiere que, si el concreto no va a tener aire intencionalmente incluido, no se tome en consideración la cantidad aire naturalmente atrapado indicado ya que la cantidad es tan pequeña que más bien puede convertirse en un factor de seguridad, también pequeño, en favor del volumen unitario del concreto.

***Tabla 6. Cantidad aproximada de aire esperado en concreto sin aire incluido para niveles de exposición y diferentes tamaños máximos de agregado***

| Tamaño máximo nominal del agregado | | Contenido de aire en porcentaje (por volumen) | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| mm | pulg. | Naturalmente atrapado | Exposición ligera | Exposición moderada | Exposición severa |
| 9.51 | ⅜ | 3.0 | 4.5 | 6.0 | 7.5 |
| 12.7 | ½ | 2.5 | 4.0 | 5.5 | 7.0 |
| 19.0 | ¾ | 2.0 | 3.5 | 5.0 | 6.0 |
| 25.4 | 1 | 1.5 | 3.0 | 4.5 | 6.0 |
| 38.1 | 1½ | 1.0 | 2.5 | 4.5 | 5.5 |
| 50.8 | 2 | 0.5 | 2.0 | 4.0 | 5.0 |
| 76.1 | 3 | 0.3 | 1.5 | 3.5 | 4.5 |
| 152.0 | 6 | 0.2 | 1.0 | 3.0 | 4.0 |

***Fuente: Tomado de A.C.I. Committee 211: Recommended Practice for Selecting Proportions for Normal Weight Concrete (A.C.I 211.1 – 70). American Concrete Institute, Detroit. Mich., 1983.***

**Estimación del contenido de agua de mezclado**

El agua de mezclado cumple dos funciones principales en una mezcla de concreto: una es hidratar las partículas de cemento, y la otra, producir la fluidez necesaria. Por lo cual la cantidad de agua de mezclado por volumen unitario de concreto, que se requiere para producir un asentamiento determinado, depende del requerimiento de agua del cemento y del requerimiento de agua del agregado, así como del contenido de aire.

En el medio colombiano se han adelantado varias investigaciones, que correlacionan el contenido de agua de mezclado con el asentamiento medido en el cono de Abrams, para diversas granulometrías, con distintos tamaños máximos y adicionalmente para partículas de forma redondeada y textura lisa y para partículas de forma angular y textura rugosa.

Los resultados de estas investigaciones han indicado que el comportamiento del valor del asentamiento en relación con el requerimiento de agua se ajusta a una familia de curvas en forma de "S". Los valores correspondientes en forma tabulada para estimar la cantidad de agua de mezclado por metro cúbico de concreto se muestran en las tablas 7 y 8 para concreto sin aire incluido y para concreto con aire incluido.

***Tabla 7. Requerimiento aproximado de agua de mezclado par diferentes asentamientos y tamaños máximos de agregado, con partículas de forma angular y textura rugosa, en concreto sin aire incluido***

| 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 |

***Fuente: Tomado de CORREA, Diego F.; PEREZ, Carlos D.: Requerimiento de agua de mezclado para concretos de peso normal, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, 1990.***

***Tabla 8. Requerimiento aproximado de agua de mezclado par diferentes asentamientos y tamaños máximos de agregado, con partículas de forma angular y textura rugosa, en concreto con aire incluido***

| 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 | 198 | 176 | 166 | 152 | 143 | 132 | 130 | 122 |
| 25 | 1 | 206 | 183 | 174 | 158 | 149 | 138 | 136 | 128 |
| 50 | 2 | 211 | 189 | 179 | 164 | 155 | 144 | 142 | 134 |
| 75 | 3 | 216 | 193 | 183 | 169 | 159 | 149 | 146 | 138 |
| 100 | 4 | 219 | 196 | 186 | 172 | 163 | 152 | 150 | 141 |
| 125 | 5 | 222 | 200 | 190 | 176 | 167 | 156 | 153 | 144 |
| 150 | 6 | 226 | 205 | 194 | 180 | 171 | 161 | 157 | 148 |
| 175 | 7 | 230 | 210 | 199 | 185 | 177 | 166 | 162 | 153 |
| 200 | 8 | 235 | 215 | 204 | 190 | 182 | 171 | 168 | 158 |

***Fuente: Tomado de CORREA, Diego F.; PEREZ, Carlos D.: Requerimiento de agua de mezclado para concretos de peso normal, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, 1990.***

**Determinación de la resistencia de diseño**

De acuerdo con las condiciones de las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo-Resistente (NSR 10), el concreto debe producirse para asegurar una resistencia a la compresión promedio (f'cr) lo suficientemente alta para minimizar la frecuencia de resultados de pruebas de la resistencia por debajo del valor de la resistencia a la compresión especificada del concreto (f´c). La resistencia a la compresión promedio o resistencia del diseño de la mezcla es calculada de la siguiente expresión:

$$\boldsymbol{f´cr = f´c + (t\sigma)} \quad \textbf{( 6.1 )}$$

Donde:

**f´cr** = Promedio requerido de resistencia o resistencia de diseño de la mezcla (kg/cm²).

**f'c** = Resistencia especificada del concreto (kg/cm²).

**t** = Constante que depende de la proporción de las pruebas que puede caer por debajo del valor de f'cr y el número de muestras usadas para hallar el valor de $\boldsymbol{\sigma}$; preferible, al menos 30 muestras deben ser usadas.

$\boldsymbol{\sigma}$ = Valor pre-estimado de la desviación estándar en kg/cm².

Por último, si no hay registros de pruebas de resistencia en donde se usaron materiales y condiciones similares a aquellas que serán empleadas, la resistencia de diseño de la mezcla f'cr se debe determinar con la tabla que emite la norma sismo resistente (NSR 10), C.5.3.2.

***Tabla 9. Resistencia promedio a la compresión requerida cuando no hay datos disponibles para establecer una desviación estándar de la muestra***

| Resistencia especificada a la compresión, MPa | Resistencia promedio requerida a la compresión, MPa |
|---|---|
| $f'_c < 21$ | $f'_{cr} = f'_c + 7.0$ |
| $21 \leq f'_c \leq 35$ | $f'_{cr} = f'_c + 8.3$ |
| $f'_c > 35$ | $f'_{cr} = 1.10f'_c + 5.0$ |

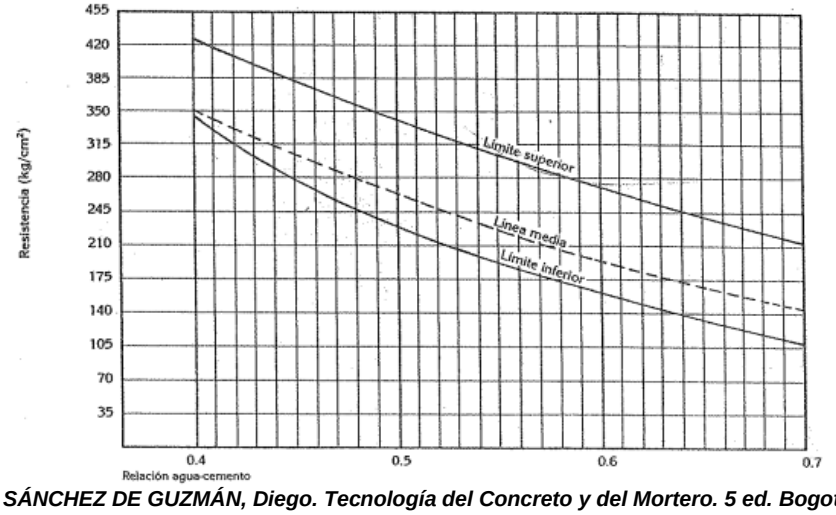
***Fuente: Tomado de Norma Sismo Resistente-NSR 10, Capítulo C.5-Calidad del concreto, mezclado y colocación.***

## Selección de la relación agua-cemento

Debido a que la resistencia del concreto se rige principalmente por la resistencia e interacción de sus fases constituyentes: pasta, agregado e interfaces de adherencia pasta-agregado, es común que los diferentes agregados y cementos produzcan resistencias distintas con la misma relación agua-cemento. Por esta razón, es importante conocer o desarrollar la correspondencia entre la resistencia y la relación agua-cemento, para cada grupo de materiales en y para diferentes edades.

Para el caso colombiano en una investigación desarrollada en la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana en el año 1991, se obtuvieron los valores mostrados en las curvas del grafico N° 5. Allí se compararon los diferentes cementos tipo I colombianos, en concretos sin aire incluido y con aire incluido producidos bajo las mismas condiciones, con los mismos materiales, curados a temperatura y humedad normales. Los límites superior e inferior de la mencionada gráfica de relación agua-cemento contra resistencia potencial desarrollada a los 28 días de edad hablan por sí mismos además corroboran la importancia de disponer de este tipo de información.

*Gráfico 5. Correspondencia entre la resistencia a la compresión a los 28 días de edad y la relación agua-cemento para los cementos colombianos, portland tipo I, en concretos con y sin aire incluido.*




***Fuente: Tomado de SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. Tecnología del Concreto y del Mortero. 5 ed. Bogotá D.C. Bhandar editores LTDA. 2001***

*Tabla 10. Correspondencia entre la resistencia a la compresión a los 28 días de edad y la relación agua-cemento para los cementos colombianos, portland tipo I, en concretos sin aire incluido.*

| 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 |

***Fuente: Tomado de SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. Tecnología del Concreto y del Mortero. 5 ed. Bogotá D.C. Bhandar editores LTDA. 2001***

*Tabla 11.Correspondencia entre la resistencia a la compresión a los 28 días de edad y la relación agua-cemento para los cementos colombianos, portland tipo I, en concretos con aire incluido.*

| Resistencia a la compresión kg/cm² | Relación agua-cemento en peso | | |
|---|---|---|---|
| | Límite superior | Línea media | Límite inferior |
| 140 | - | 0.65 | 0.58 |
| 175 | - | 0.59 | 0.52 |
| 210 | 0.65 | 0.54 | 0.49 |
| 245 | 0.61 | 0.50 | 0.46 |
| 280 | 0.55 | 0.44 | 0.41 |
| 315 | 0.51 | 0.41 | 0.39 |
| 350 | 0.46 | 0.37 | 0.36 |

***Fuente: Tomado de SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. Tecnología del Concreto y del Mortero. 5 ed. Bogotá D.C. Bhandar editores LTDA. 2001***

De otra parte, la relación agua-cemento no sólo determina los requisitos a la durabilidad y propiedades para el acabado del concreto, debido a que éste debe ser capaz de soportar aquellas exposiciones que puedan despojarlo de su capacidad de servicio, tales como: congelación y deshielo, humedecimiento y secado, calentamiento y enfriamiento, agentes anticongelantes, resistencia a la abrasión y sustancias químicas agresivas entre otras.

En un concreto de resistencia razonable y adecuadamente colocado, es durable bajo condiciones ordinarias, pero cuando no es necesario que posea alta resistencia y las condiciones de exposición sean tales que la alta durabilidad sea vital, son éstas las que deben determinar la relación agua-cemento debe mantenerse baja, aun cuando los requisitos de resistencia puedan cumplirse con un valor más alto.

**Cálculo del contenido de cemento**

Una vez que el contenido de agua de mezclado y la relación agua-cemento han sido determinados, el contenido de cemento por metro cúbico de concreto es fácilmente establecido, al dividir el contenido de agua de mezclado entre la relación agua-cemento:

$$\boldsymbol{C = \frac{A}{A/C}} \quad \textbf{(6.2)}$$

Donde:

C = Contenido de cemento, en kg/m³.

A = Requerimiento de agua de mezclado, en kg/m³.

A/C = Relación agua-cemento, por peso.

**Estimación de las proporciones de agregados**

Por lo general, la estimación de las proporciones de los agregados está basada en su tamaño máximo y gradación, debido a que la combinación granulométrica total de ambos agregados, finos y gruesos es de considerable importancia en relación con las propiedades del concreto, tanto en estado fresco como en estado endurecido.

El agregado se puede encontrar bajo tres circunstancias diferentes, tal y como lo han definido Ramos, Porrero y Grases:

a. **Agregados controlados:** Son aquellos agregados que tienen estrictamente garantizada su calidad en todos los aspectos. Son producidos en plantas destinadas a ese fin específico, las cuales cuanto más tecnificadas sean, mayores ventajas presentan en cuanto a los controles necesarios para garantizar la granulometría y calidad indicadas. Sin embargo, esta situación es relativamente poco frecuente en nuestro medio.

b. **Agregados conocidos, pero no controlados:** Son aquellos que provienen de una zona o lugar de explotación de la que habitualmente se extraen agregados, cuya inocuidad ya fue analizada en algunas ocasiones y probada en algunas otras, pero que la preparación y control a que son sometidos no permiten garantizar que su limpieza y granulometría sean adecuadas y se mantengan en el tiempo. Para que estos agregados posean la categoría de controlados, no basta con hacer un ensayo esporádico al material, que puede cumplir en ese momento o en cuanto a esa muestra solamente. Ello requiere que las operaciones de limpieza y clasificación sean las adecuadas y estén controladas mediante ensayos cuya frecuencia se garantice la calidad del producto en todo momento. Esta situación es muy frecuente en nuestro medio.

**c. Agregados nuevos:** Son agregados de los cuales se desconocen sus propiedades y características.

De manera que dependiendo de cada una de estas tres situaciones y aún solventado el problema de la limpieza, la selección de las proporciones de los agregados se cimiente en si hay o no granulometrías que cumplan con los limites establecidas (NTC 174), para emplear uno u otro de los procedimientos para dosificar una mezcla de concreto. (Sánchez, 2001, p.239)

**Método A.C.I. 211.1**

Este método tiene su fundamento en la expresión b/b0 que fue introducida por Richard y Talbot entre 1921 1923 en los Estados Unidos de América. En esta expresión:

b = Volumen absoluto o sólido del agregado grueso, por unidad de volumen de concreto.

$b_0$ = Volumen absoluto o sólido del agregado grueso, por unidad de volumen compactada de agregado grueso.

$b/b_0$ = Volumen compactado de agregado grueso, por unidad de volumen de concreto.

Esta relación y su significado se comprenden fácilmente haciendo la siguiente consideración:

$$\boldsymbol{V = b + (PV)} \quad \textbf{(6.3)}$$

Donde:

V = Volumen seco y compactado del agregado grueso por volumen unitario de concreto (Volumen de las partículas de agregado más el volumen de los espacios entre partícula y partícula).

b = Volumen absoluto o sólido del agregado grueso, por unida de volumen de concreto.

P = Porcentaje de vacíos en el conjunto (espacios entre partícula y partícula).

Pero, el volumen b0 puede ser expresado como:

$$\boldsymbol{b0 = 1 - (P1)} \quad \textbf{(6.4)}$$

Luego:

$$\boldsymbol{P = 1 - b0}$$

Reemplazando este valor en la ecuación 6.3 se obtiene:

$$\boldsymbol{V = b + (1 - b0)V}$$

$$\boldsymbol{V = b + V - (b0V)} \quad \textbf{(6.5)}$$

Luego:

$$\boldsymbol{b = b0V}$$

Donde:

$$\boldsymbol{V = b/b0} \quad \textbf{(6.6)}$$

El valor de b0 se puede calcular a partir de la masa unitaria seca y compactado con varilla del agregado grueso y de su densidad aparente seca, puesto que:

$$\boldsymbol{b0 = \frac{Masa\ unitaria\ compacta}{Densidad\ aparente\ seca}} \quad \textbf{(6.7)}$$

De acuerdo con A.M. Neville (1984) citado por Sánchez (2001, p.240). el método A.C.I. – 211 aprovecha el hecho de que "la relación óptima del volumen seco y compactado de agregado grueso al volumen total de concreto depende únicamente del tamaño máximo del agregado y de la granulometría del agregado fino. En este caso, la forma de las partículas del agregado grueso no entra directamente en la relación, debido a que, por ejemplo, el agregado triturado tiene un

volumen aparente mayor para un mismo peso (es decir, masa unitaria menor) que un agregado bien redondeado. Por tanto, el factor de forma es automáticamente tomado en cuenta en la determinación de la masa unitaria."

En este método, el peso seco del agregado grueso requerido por metro cúbico de concreto es simplemente igual al valor tomado de la tabla siguiente multiplicado por su respectivo peso unitario compacto en kg/m³. De modo que, después de obtener el peso seco del agregado grueso, los pesos de todos los demás ingredientes han sido estimados, excepto aquel del agregado fino.

***Tabla 12. Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto***

*Volumen de agregado grueso, seco y compactado con varilla (a), por volumen de concreto para diferentes módulos de finura de la arena (b)*

| Tamaño máximo nominal del agregado | | Módulo de finura de la arena | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| mm | pulg | 2.40 | 2.60 | 2.80 | 3.00 |
| 9.51 | ⅜" | 0.50 | 0.48 | 0.46 | 0.44 |
| 12.7 | ½ | 0.59 | 0.57 | 0.55 | 0.53 |
| 19.0 | ¾ | 0.66 | 0.64 | 0.62 | 0.60 |
| 25.4 | 1 | 0.71 | 0.69 | 0.67 | 0.65 |
| 38.1 | 1½ | 0.75 | 0.73 | 0.71 | 0.69 |
| 50.8 | 2 | 0.78 | 0.76 | 0.74 | 0.72 |
| 76.1 | 3 | 0.82 | 0.80 | 0.78 | 0.76 |
| 152.0 | 6 | 0.87 | 0.85 | 0.83 | 0.81 |

(a) Los volúmenes están basados en agregados secos y compactos con varilla, como se describe en la norma A.S.T.M. C-29. Estos volúmenes se han seleccionado de relaciones empíricas para producir un concreto con un grado de manejabilidad apropiado para la construcción reforzada usual. Para obtener un concreto con menos trabajabilidad como el que se utiliza en la construcción de pavimentos de concreto, éstos valores se pueden aumentar en un 10%. Para concreto con más trabajabilidad como el que algunas veces se requiere cuando la colocación se efectúa por bombeo, estos valores se pueden reducir hasta en un 10%.

(b) El módulo de finura de la arena es igual a la suma de las relaciones (acumulativas) retenidas en tamices de malla con aberturas de 0,149, 0,297, 0,595, 1,19, 2,38 y 4,76 mm.

***Tomado de A.C.I. Committee 211: Recommended Practice for Selecting Proportions for Normal Weight Concrete (A.C.I 211.1 – 70). American Concrete Institute, Detroit. Mich., 1983.***

Pero el método más preciso y preferido es el "Método del volumen absoluto," el cual requiere del conocimiento de los volúmenes absolutos desplazados por los ingredientes. Es decir, que los volúmenes absolutos de cemento, agua, contenido de aire, y agregado grueso son sustraídos del volumen total, y que la diferencia hallada será el volumen absoluto del agregado fino. El volumen absoluto ocupado en el concreto por cada ingrediente es igual a su peso dividido por su respectivo peso específico, como se indica en la siguiente expresión:

$$Vi = Pi/Gi \quad \textbf{(6.8)}$$

Donde:

**Vi** = Volumen absoluto del ingrediente, en l/m³.

**Pi** = Peso seco del ingrediente, en kg/m³.

**Gi** = Peso específico del ingrediente (para los agregados debe usarse el peso específico aparente seco), en g/cm³.

Finalmente, el peso seco del agregado fino puede entonces ser obtenido al multiplicar su volumen absoluto pro su respectivo peso específico aparente. Este proceso es resumido en la tabla N°13.

***Tabla 13. Peso seco y volumen absoluto de los ingredientes por metro cúbico de concreto***.

| *Ingrediente* | *Peso seco kg/m³* | *Peso específico g/cm³* | *Volumen absoluto l/m³* |
|---|---|---|---|
| Cemento | $P_c$ | $G_c$ | $V_c$ |
| Agua | $P_a$ | 1.0 | $V_a$ |
| Cont. de aire | - | - | $A$ |
| Agregado grueso | $P_{ag}$ | $G_{ag}$ | $V_{ag}$ |
| Agregado fino | $P_{af}$ | $G_{af}$ | $V_{af}$ |
| TOTAL | $P_u$ | | 1.000 |

NOTA: En esta tabla:

- $P_c$, $P_{ag}$, $P_{af}$ = Peso seco de cemento, agregado grueso y agregado fino respectivamente.
- $P_w$ = Peso del agua.
- $G_c$ = Peso específico del cemento.
- $G_{ag}$, $G_{af}$ = Peso específico aparente del agregado grueso y del agregado fino respectivamente.
- $V_c$, $V_a$, $V_{ag}$, $V_{af}$ = Volumen absoluto de cemento, agua, agregado grueso y agregado fino respectivamente.
- $A$ = Volumen absoluto del contenido de aire (Porcentaje de aire dividido por 100 y multiplicado por 1.000, en l/m³).
- $P_u$ = Peso unitario del concreto fresco por metro cúbico.

***Fuente: Tomado de A.C.I. Committee 211: Recommended Practice for Selecting Proportions for Normal Weight Concrete (A.C.I 211.1 – 70). American Concrete Institute, Detroit. Mich., 1983.***

Este método es aplicable a mezclas cuyos asentamientos sean al menos de 3 cm. Para mezclas de consistencia más rígida se deben hacer algunas variaciones. En primer lugar, la trabajabilidad

se mide por otros métodos como el consistómetro Vebe o la mesa de impactos y en segundo lugar, el contenido de agregado grueso usado es mucho más alto que el de mezclas de mayor consistencia.

Por último, este método es aplicado cuando los agregados están bien gradados y en concordancia con la norma NTC 174 (ASTM C-33), la cual provee los límites granulométricos para agregado grueso y fino deducidos experimentalmente. De tal manera que este método solo debe ser empleado cuando los agregados hayan sido clasificados como "Agregados controlados", de acuerdo con definiciones dadas.

Pero, de acuerdo con Mindess, S., y Young, J.F (1981) citado por Sánchez (2001, p.242) "si un agregado no está conforme con los límites de granulometría de la norma ASTM C-33, ello no necesariamente significa que no se puede hacer concreto con este agregado. Lo que ello indica es que ese concreto puede requerir más pasta y es más susceptible de segregarse durante su manejo y colocación".

Por esta razón es que se considera interesante complementar la excelente metodología del método A.C.I.-211, con el procedimiento gráfico empleado por los ingleses, con el objeto de contemplar aquellos agregados cuyas granulometrías no cumplen con los límites especificados, pero que son susceptibles de optimizarse; es decir, aquellos definidos como "Agregados conocidos, pero no controlados".

**Método Gráfico**

El uso del método A.C.I. – 211 está destinado para agregados controlados que se encuentran en condiciones ideales, pero esto no es posible encontrar en Colombia por lo general, por lo cual es preferible hacer uso de una especificación que cubra todo el agregado del concreto, desde las partículas más finas de la arena hasta las partículas más grandes del agregado grueso, la cual permita encontrar la mejor proporción entre la arena y la grava de los cuales se dispone. En Colombia es frecuente que ni la arena ni la grava cumplan con las especificaciones granulométricas de la norma NTC 174 (Agregados no controlados o desconocidos).

Un método que se usó extensamente para determinar el porcentaje óptimo de agregados consiste en buscar la combinación de los agregados disponibles que produzca la máxima densidad. Este método fue propuesto por Fuller y Thompson en el año de 1907, donde el contenido de vacíos es mínimo, y consiste en combinar los agregados de tal forma, que la granulometría del conjunto se adapte lo más cercanamente posible a la "curva ideal". Según Fuller y Thompson al tener una granulometría ideal se obtenía la máxima densidad y por lo tanto la mayor resistencia. Sin en embargo, en la práctica, la curva ideal da lugar a mezclas de agregados con poca cantidad de material fino (especialmente partículas que pasan los tamices N° 50 y N° 100 para proveer buena trabajabilidad. De otra parte, al ser mínimo el contenido de vacíos, la trabazón entre partículas es bastante alta, por lo cual la mezcla de concreto es difícil de vibrar y compactar, especialmente en concretos pobres y con agregados de textura rugosa. En mezclas ricas, el inconveniente no es tanto por la presencia de mayor cantidad de pasta de cemento que lubrica los agregados y da buena manejabilidad.

Pero independiente de estas teorías, lo que interesa es obtener una granulometría tal que la manejabilidad de la mezcla sea adecuada con la menor cantidad de pasta posible. Una carencia de agregados finos conducirá a mezclas ásperas, segregables y difíciles de trabajar, en tanto que un exceso de finos exigirá un alto contenido de pasta de cemento, danto origen a problemas de retracción, y obviamente, a mezclas más costosas e incluso de resistencias menores.

Experimentalmente se han encontrado curvas límites superiores en inferiores, correspondientes a granulometrías continúas apropiadas para distintos tamaños máximos, según la ecuación:

$$P = 100\frac{d^q}{D} \quad \textbf{(6.9)}$$

Tal como se mencionó en este capítulo, algunas de estas curvas basadas en experiencia teórica y práctica (en el medio colombiano), han arrojado como valor más práctico de la potencia q = 0,35 (límite fino) y q = 0,55 (límite grueso) par valores aceptables de trabajabilidad (sin segregación) y buena resistencia a la compresión con el más bajo contenido de cemento. Estos límites de gradación, que son similares a los de la norma NTC 174, se indican a continuación y están basados en la ecuación 6.9, para agregados de varios tamaños máximos. Por tanto, los agregados deben proporcionarse de manera tal que la granulometría resultante quede comprendida dentro de los límites indicados por estas curvas.

*Tabla 14.* ***Límites de gradación recomendados para granulometrías continuas en porcentajes que pasa para distintos tamaños máximos de agregado.***

| Tamiz | | Porcentaje que pasa para el tamaño máximo indicado en mm (pulg.) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| mm | pulg. | 76.1mm (3") | 50.8mm (2") | 38.1mm (1½") | 25.4mm (1") | 19.1mm (¾") | 12.5mm (½") | 9.51mm (⅜") |
| 76.1 | 3 | 100 | | | | | | |
| 50.8 | 2 | 80-87 | 100 | | | | | |
| 38.1 | 1½ | 68-79 | 85-90 | 100 | | | | |
| 25.4 | 1 | 55-68 | 68-78 | 80-87 | 100 | | | |
| 19.1 | ¾ | 47-62 | 58-71 | 68-79 | 85-90 | 100 | | |
| 12.7 | ½ | 37-53 | 46-61 | 55-68 | 68-78 | 80-87 | 100 | |
| 9.51 | ⅜ | 32-48 | 40-56 | 47-62 | 58-71 | 68-79 | 85-90 | 100 |
| 4.76 | 4 | 22-38 | 27-44 | 32-48 | 40-56 | 47-62 | 58-71 | 68-79 |
| 2.38 | 8 | 15-30 | 19-34 | 22-38 | 27-44 | 32-48 | 40-56 | 47-62 |
| 1.19 | 16 | 10-23 | 13-27 | 15-30 | 19-34 | 22-38 | 27-44 | 32-48 |
| 0.595 | 30 | 7-18 | 9-21 | 10-23 | 13-27 | 15-30 | 19-34 | 22-38 |
| 0.297 | 50 | 5-14 | 6-16 | 7-18 | 9-21 | 10-23 | 13-27 | 15-30 |
| 0.149 | 100 | 3-11 | 4-13 | 5-14 | 6-16 | 7-18 | 9-21 | 10-23 |

(a) El porcentaje máximo permitido de material que pasa la malla No. 200 para concreto sujeto a desgaste por abrasión debe ser 3% para arena natural y 5% para arena manufacturada. En otros casos, puede ser 5% y 7% respectivamente.

***Fuente: Tomado de SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. Tecnología del Concreto y del Mortero. 5 ed. Bogotá D.C. Bhandar editores LTDA. 2001***

En este punto es importante recordar que las "granulometrías ideales" son imposibles de reproducir en la práctica, y que excelente concreto puede ser hecho con un amplio rango de gradaciones del agregado, aunque granulometrías por fuera de estos límites pueden ser no económicas y difíciles de manejar respecto de la segregación, acabado, etc. Sin embargo, es deseable proporcionar los materiales disponibles de tal manera que la gradación de los materiales combinados sea lo más similar posible a uno de estos tipos de curvas ideales, los agregados combinados estén en conformidad con los límites de granulometría propuestos en la tabla anterior.

Para ello, el procedimiento más exacto para calcular la proporción de los agregados en la mezcla es el método gráfico, el cual provee las cantidades de cada tamaño de partícula de agregado grueso y fino, referido a una curva de gradación recomendada. Este procedimiento se detalla a continuación:

**a.** Se dibuja una cuadrícula de 10 x 10,

**b.** A lo largo de las ordenadas y en orden ascendente se numeran porcentajes iguales de 0 a 100.

**c.** En la abscisa superior se numeran porcentajes iguales de 100 a 0 y de derecha a izquierda. Allí se leerá el porcentaje de agregado fino referido al agregado total.

**d.** En las ordenadas del lado izquierdo se marcan los porcentajes que pasan correspondiente al agregado fino, anotando el número o abertura del tamiz correspondiente.

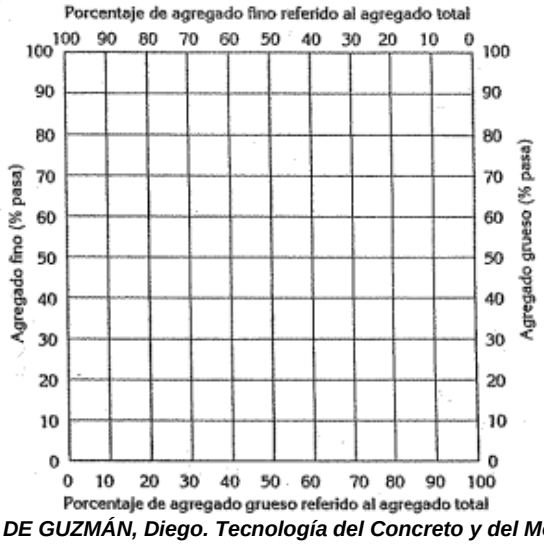
**e.** En las ordenadas del lado derecho se repite lo mismo con el agregado grueso.

**f.** En el eje inferior de las abscisas se leerá entonces, el porcentaje de agregado grueso referido al agregado total.

**g.** Los puntos correspondientes a tamices de igual número de abertura en las dos granulometrías se unen entre sí por una línea recta. Estas líneas representan los porcentajes posibles de la mezcla de agregados que pueden pasar por cada uno de los tamices, El cuadro elaborado permite calcular gráficamente la granulometría para cualquier mezcla de un agregado fino y un agregado grueso.

Para ello basta con encontrar sobre el eje de las abscisas, una línea paralela a las ordenadas correspondiente a la mezcla deseada y la intersección de esta línea con las líneas inclinadas indica el porcentaje que pasa el respectivo tamiz.

***Procedimiento gráfico para encontrar las proporciones en que deben mezclarse los agregados***




***Fuente: Tomado de SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. Tecnología del Concreto y del Mortero. 5 ed. Bogotá D.C. Bhandar editores LTDA. 2001***

**h.** Sobre las líneas trazadas, según el párrafo anterior y para el tamaño máximo correspondiente, se marcarán los límites porcentuales (máximo y mínimo) que para cada tamiz establece la tabla de granulometría ideal de Fuller y Thompson. La escala de lectura es la misma que la de las ordenadas.

**i.** Las franjas aisladas, definidas por los límites marcados anteriormente, deben comprender la línea vertical paralela a las ordenadas que indique el "porcentaje de agregado referido al agregado total" (Relación arena-agregado total), para que la granulometría de esta mezcla esté comprendida dentro de los límites establecidos en la tabla anterior.

**j.** Hechos los pasos anteriores; los "porcentajes que pasan", de la granulometría resultante, pueden leerse directamente en las ordenadas. Para ello, debe recordarse que la intersección de la línea vertical paralela a las ordenadas con las líneas inclinadas, indica el porcentaje que pasa por el respectivo tamiz. Este procedimiento es aplicable a más de dos agregados.

Con el fin de comprender más fácilmente este procedimiento, supóngase las granulometrías de agregado grueso y agregado fino dadas en la tabla 15, el porcentaje que pasa es marcado a lo largo de los cuatro lados de una cuadricula de 10 por10. Para cada tamaño de partícula o tamiz, el porcentaje que pasa es marcado en las ordenadas de la izquierda representando el agregado fino y similarmente, en las ordenadas de la derecha el agregado grueso. Los puntos correspondientes a igual tamiz son unidos por una línea recta.

Sobre estas líneas deben ser marcados los límites fino y grueso dados en la tabla 14 (para un tamaño máximo de 25,4 mm), de modo que, a su vez, estos puntos son unidos por las líneas punteadas, como se muestra en el gráfico 6.

Ahora, refiriéndose a la escala horizontal en la parte superior, el efecto de cualquier porcentaje particular de agregado fino en la mezcla de los dos materiales puede ser examinado, y la granulometría de ese material combinado está dada por la correspondiente línea vertical que cruza los diversos tamices que se encuentran dentro de los límites.

En este caso, entre 54% de agregado fino combinado con 46% de agregado grueso (límite fino) y 40% de agregado fino combinado con 60% de agregado grueso (límite grueso). La primera combinación (54%-46%), es para concreto más trabajable por ejemplo para bombeo o tubo-embudo Tremie), y la segunda combinación (40%-60%) es para concreto menos trabajable, por ejemplo, para la construcción de pavimentos. (Sánchez, 2001, p.245)

*Tabla 15.* ***Ejemplo de combinación de agregados para obtener una granulometría tipo en porcentaje que pasa***

| Tamiz | | Porcentaje que pasa | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| mm | pulg. | Agregado grueso | Agregado fino | Límites (Tabla 11.17) | Granulometría combinada |
| 25.4 | 1 | 100.0 | | 100 | 100.0 |
| 19.0 | ¾ | 77.0 | | 85-90 | 87.8 |
| 12.7 | ½ | 50.0 | | 68-78 | 73.5 |
| 9.51 | ⅜ | 32.0 | 100.0 | 58-71 | 64.0 |
| 4.76 | No. 4 | 15.0 | 91.0 | 40-56 | 50.7 |
| 2.38 | No. 8 | 8.0 | 72.0 | 27-44 | 38.1 |
| 1.19 | No. 16 | 4.0 | 51.0 | 19-34 | 26.1 |
| 0.595 | No. 30 | --- | 39.0 | 13-27 | 18.3 |
| 0.297 | No. 50 | --- | 28.0 | 9-21 | 13.2 |
| 0.149 | No. 100 | --- | 15.0 | 6-16 | 7.1 |

***Fuente: Tomado de SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. Tecnología del Concreto y del Mortero. 5 ed. Bogotá D.C. Bhandar editores LTDA. 2001***

Pero la granulometría del agregado combinado que es más similar a la "gradación ideal propuesta", donde q= 0,45 en la ecuación de Fuller y Thompson está definida por la línea vertical, cuya combinación es del 47% de agregado fino con el 53% de agregado grueso, lo cual está indicado en la tabla anterior.

Este método de combinación tiene la ventaja adicional de que puede ser también utilizado para mezclar más de dos agregados. Por ejemplo, en algunos casos puede ser necesario combinar alunas fuentes de agregado grueso entre ellas mismas o de igual modo algunas de fuentes de agregados finos, para después entonces combinar la gradación combinada del agregado grueso combinada del agregado fino.

***Tabla 16.*** ***Límites de granulometría propuestos para agregado grueso***

| Tamiz | | AGREGADO GRUESO | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | % que pasa para los tamaños máximos indicados en mm (pulg.) | | | | |
| mm | pulg. | 38.1 mm (1½") | 25.4 mm (1") | 19.0 mm (¾") | 12.7 mm (½") | 9.51 mm (⅜") |
| 38.1 | 1½ | 100 | | | | |
| 25.4 | 1 | 68-78 | 100 | | | |
| 19.0 | ¾ | 48-64 | 73-81 | 100 | | |
| 12.7 | ½ | 25-47 | 41-59 | 57-71 | 100 | |
| 9.51 | ⅜ | 13-36 | 22-45 | 32-53 | 59-73 | 100 |
| 4.76 | No. 4 | 0-14 | 0-16 | 0-17 | 0-18 | 0-21 |

***Fuente: Tomado de REY, Carlos R: Granulometrías óptimas para concreto de peso normal, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, 1987.***

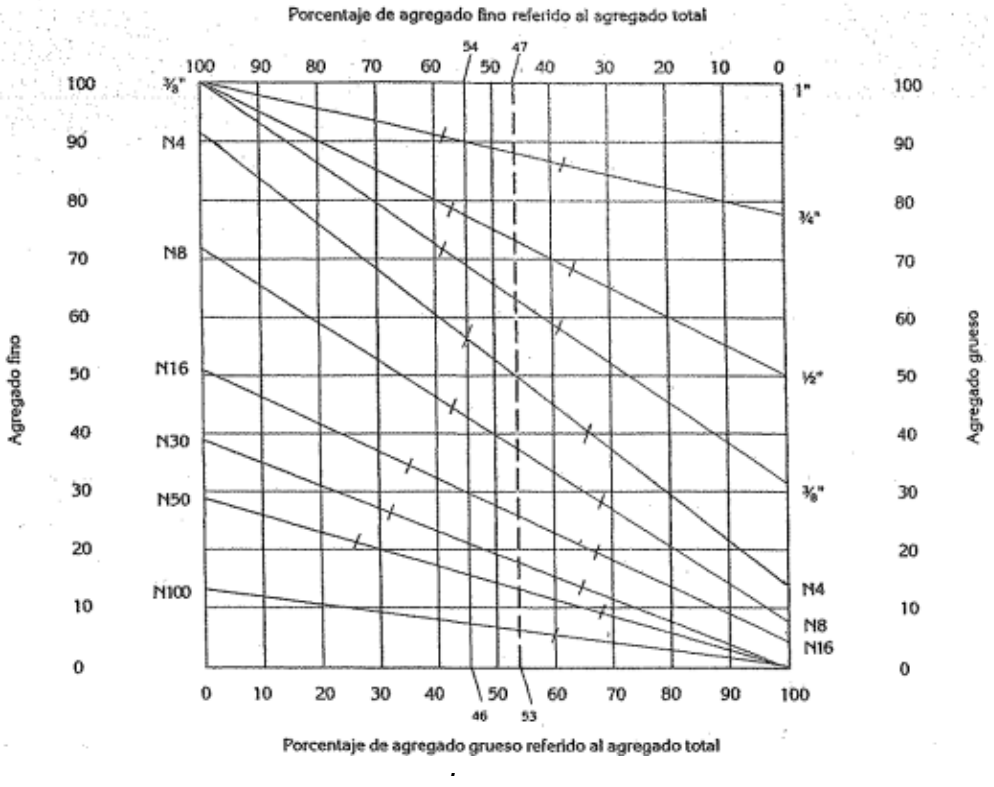
***Tabla 17. Límites de granulometría propuestos para agregado fino***

| Tamiz | | AGREGADO FINO (a) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | % que pasa para los tamaños máximos indicados en mm (pulg.) | | | | |
| mm | pulg. | 38.1 mm (1½") | 25.1 mm (1") | 19.0 mm (¾") | 12.7 mm (½") | 9.51 mm (⅜") |
| 9.51 | ⅜ | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 4.76 | No. 4 | 82-100 | 85-100 | 88-100 | 91-100 | 93-100 |
| 2.38 | No. 8 | 57-96 | 58-93 | 60-89 | 63-87 | 65-84 |
| 1.19 | No. 16 | 39-76 | 41-72 | 41-70 | 42-68 | 44-65 |
| 0.595 | No. 30 | 26-59 | 28-57 | 28-55 | 30-52 | 31-51 |
| 0.297 | No. 50 | 18-45 | 20-44 | 19-42 | 21-42 | 21-41 |
| 0.149 | No. 100 | 13-35 | 13-38 | 14-33 | 14-32 | 14-31 |

a) El porcentaje máximo permitido de material que pasa la malla No. 200 para concreto sujeto a desgaste por abrasión debe ser 3% para arena natural y 5% para arena manufacturada. En otros casos, puede ser 5% y 7% respectivamente.

***Fuente: Tomado de REY, Carlos R: Granulometrías óptimas para concreto de peso normal, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, 1987***

***Gráfico 6. Ejemplo de granulometría combinada (Método Gráfico)***




***Fuente: Tomado de SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. Tecnología del Concreto y del Mortero. 5 ed. Bogotá D.C. Bhandar editores LTDA. 2001***

Para estos casos deben ser consultados los límites granulométricos propuestos, para agregados gruesos de varios tamaños máximos en la tabla 16, y sus apropiados límites de gradación para agregado fino en la tabla 17. Estas tablas están basadas en los valores de la tabla 14.

Finalmente, es importante recordar que las proporciones en las cuales los agregados finos y gruesos deben ser combinadas están dadas por peso, debido a que sus granulometrías, en porcentaje que pasa, están basadas en pesos retenidos. Por ello, el volumen absoluto y el peso seco de los agregados, por metro cúbico de concreto, pueden ser determinados de la siguiente manera:

$$\boldsymbol{V_r = 1 - (V_c + V_a + A)} \quad \textbf{(6.10)}$$

Donde:

**Vr** = Volumen absoluto de los agregados, en l/m³.

**Vc** = Volumen absoluto del cemento, en l/m³.

**Va** = Volumen absoluto de agua, en l/m³.

**A** = Volumen absoluto del contenido de aire, en l/m³.

$$\boldsymbol{P_r = V_f G_a} \quad \textbf{(6.11)}$$

Donde:

**Pr** = Peso seco de los agregados, en kg/m³.

**Vf** = Volumen absoluto de los agregados, en l/m³,

**Ga** = Peso específico aparente de la mezcla de los dos agregados, calculado con la siguiente ecuación:

$$\boldsymbol{G_a = \frac{G_{ag} G_{af}}{G_{ag} n + G_{af} m}} \quad \textbf{(6.12)}$$

Donde:

**Gag** = Peso específico aparente del agregado grueso, en g/cm³.

**Gaf** = Peso específico aparente del agregado fino, en g/cm³.

**n** = Proporción de agregado fino en la mezcla de agregados expresada en tanto por uno.

**m** = Proporción de agregado grueso en la mezcla de agregado expresada en tanto por uno.

$$P_{ag} = P_r m \quad \textbf{(6.13)}$$

$$P_{af} = P_r n \quad \textbf{(6.14)}$$

Donde:

**Pag** = Peso seco del agregado grueso, en kg/m³.

**Paf** = Peso seco del agregado fino, en kg/m³.

**Pr** = Peso seco de los agregados, en kg/m³.

**n** = Proporción de agregado fino en la mezcla de agregados expresada en tanto por uno.

**m** = Proporción de agregado grueso en la mezcla de agregado expresada en tanto por uno.

$$V_{ag} = \frac{P_{ag}}{G_{ag}} \quad \textbf{(6.15)}$$

$$V_{af} = \frac{P_{af}}{G_{af}} \quad \textbf{(6.16)}$$

Donde:

**Vag** = Volumen absoluto del agregado grueso, en l/m³.

**Vaf** = Volumen absoluto del agregado fino, en l/m³.

**Pag** = Peso seco del agregado grueso, en kg/m³.

**Paf** = Peso seco del agregado fino, en kg/m³.

**Ajuste por humedad en los agregados**

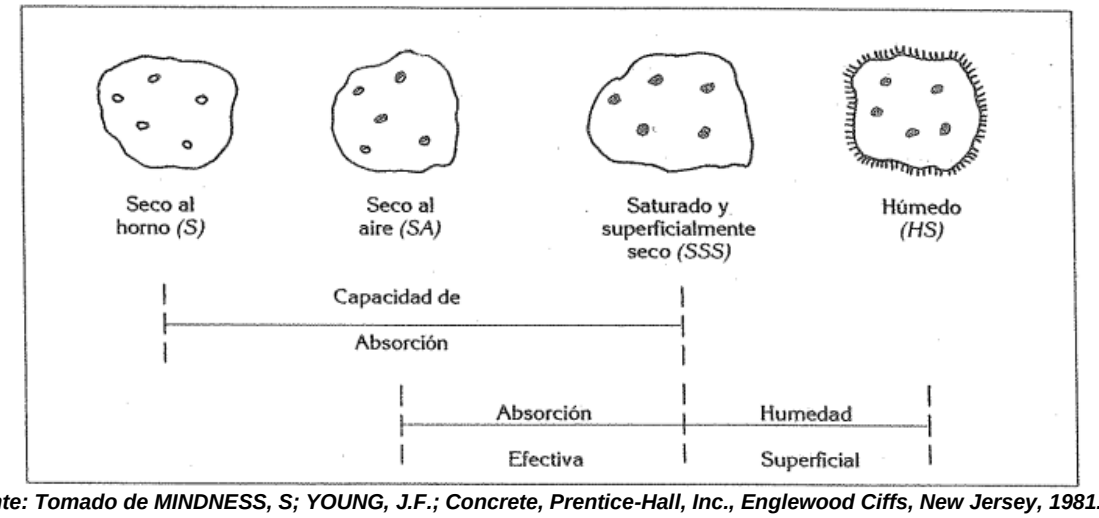
Debido a que los agregados pétreos presentan cierta porosidad (poros que están conectados a la superficie de las partículas), el agua de mezclado puede ser absorbida dentro del cuerpo de las partículas. Por otra parte, la superficie de las partículas también puede retener agua formando una película de humedad. De tal manera que los agregados almacenados en patio pueden tener un contenido de humedad variable que impide su dosificación por peso seco.

Bajo estas consideraciones, sí el agua de mezclado es absorbida por las partículas del agregado, la relación agua-cemento es rebajada y la manejabilidad del concreto reducida. Pero, sí las partículas del agregado presentan una película de agua sobre su superficie, el contenido de agua de mezclado es incrementado, lo cual conduce a una alta relación agua-cemento y a una alta trabajabilidad, reduciendo la resistencia.

Para calcular la cantidad de agua que los agregados pueden sustraer o adicionar a la pasta de cemento de una mezcla determinada, se han definido cuatro estados de humedad de los agregados que permiten estudiar la influencia de los poros internos de las partículas del agregado, su permeabilidad y absorción.

1. Seco al horno (S): Toda la humedad del agregado removida por secado en horma a 105 °C de temperatura hasta obtener un peso constante. Todos los poros están vacíos.
2. Seco al aire (SA): Toda la humedad removida de la superficie, pero los internos parcialmente saturados.
3. Saturado y superficialmente seco (SSS): Todos los poros llenos de agua, pero sin película de humedad sobre la superficie de las partículas.
4. Húmedo (HS): Todos los poros completamente llenos de agua y adicionalmente con una película de agua sobre la superficie de las partículas.

***Estados de humedad de los agregados***




***Fuente: Tomado de MINDNESS, S; YOUNG, J.F.; Concrete, Prentice-Hall, Inc., Englewood Ciffs, New Jersey, 1981.***

De estos cuatro estados, solo dos, el S y el SSS, corresponden a contenidos específicos de humedad. El primero, por tener una humedad igual a cero; y el segundo, por tener una humedad equivalente a tener todos los poros saturables del agregado llenos de agua. Ambos pueden ser usados como referencia para calcular el contenido de humedad. En la imagen también se han indicado tres términos: Capacidad de absorción, absorción efectiva y humedad superficial. Tomando el estado SSS como el de referencia, estos términos se han definido como sigue:

La capacidad de absorción (CA o absorción representa la máxima cantidad de agua que el agregado puede absorber en sus poros saturables. Esta es calculada de la diferencia que hay entre el estado SSS y el estado S, expresada como un porcentaje del peso en estado S.

$$CA = \left[\frac{P_{SSS} - P_s}{P_s}\right] * 100 \quad \textbf{(6.17)}$$

Donde:

**Psss** = Peso de una muestra de agregado en estado SSS.

**Ps** = Peso de una muestra de agregado en estado S.

**CA** = La capacidad de absorción

La absorción efectiva (AE) representa la cantidad de agua requerida para llevar el agregado del estado SA al estado SSS. Esta se calcula de la diferencia que hay entre el estado SSS y el estado SA, expresada como un porcentaje del peso en estado SSS, como sigue:

$$\boldsymbol{AE = \left[\frac{P_{SSS} - P_{sa}}{P_{sss}}\right] * 100} \quad \textbf{(6.18)}$$

Donde:

**AE** = La absorción efectiva

**Psss** = Peso de una muestra de agregado en estado SSS.

**Psa** = Peso de una muestra de agregado en estado SA.

La humedad superficial (HS o humedad libre), representa el agua en exceso (que compone la película de humedad sobre la superficie de las partículas) respecto al estado SSS. Esta se expresa como un porcentaje del estado SSS de la siguiente manera:

$$\boldsymbol{HS = \left[\frac{P_{hS} - P_{sss}}{P_{sss}}\right] * 100} \quad \textbf{(6.19)}$$

Donde:

**HS** = La humedad superficial

**Psss** = Peso de una muestra de agregado en estado SSS.

**Phs** = Peso de una muestra de agregado en estado HS.

La capacidad de absorción es utilizada para conocer la porosidad de las partículas de agregado y su efecto en el diseño de mezclas. La absorción efectiva es empleada para calcular el peso del agua absorbida por el agregado en la mezcla. La humedad superficial o libre es utilizada para calcular la cantidad de agua que debe ser sustraída del agua de mezclado en el momento de la dosificación.

Puesto que el agua de absorción de los agregados no hace parte del agua de mezclado y los agregados presentan algún grado de saturación que depende de las condiciones de almacenamiento y del estado del tiempo, necesariamente hay que determinar ese grado de humedad en el campo y hacer las correcciones pertinentes para dosificar correctamente los agregados. La forma más exacta de determinar la humedad de los agregados "in situ", es pesar una muestra inalterada y someterla posteriormente a un secado al horno hasta llevarla a la condición S. De tal forma que el contenido de humedad del agregado H es calculado por la diferencia en peso que hay, entre el peso del agregado con humedad natural en patio de almacenamiento y el peso del agregado en estado S, de la siguiente manera:

$$\boldsymbol{H = \left[\frac{P_a - P_s}{P_s}\right] * 100} \quad \textbf{(6.20)}$$

Donde:

**H** = humedad del agregado

**Pa** = Peso de una muestra de agregado en condiciones de patio.

**Ps** = Peso de una muestra de agregado en estado S.

Una vez conocido el contenido de humedad de los agregados, bien sea por este método u otros más rápidos como el medidor de humedad (Speedy) o algunos métodos eléctricos, se procede a hacer la corrección de peso seco a peso húmedo. De manera tal, que la cantidad real de cada agregado que debe ser pesada será igual a su peso seco incrementado en el porcentaje de agua que contenga, incluyendo el agua absorbida y el agua sobre la superficie de sus partículas. Es decir, que el "peso húmedo" de cada agregado en el momento de su dosificación será igual a:

$$\boldsymbol{Ph = Ps\left[\frac{1 + H}{100}\right]} \quad \textbf{(6.21)}$$

Donde:

**Ph** = Peso húmedo del agregado.

**Ps** = Peso del agregado en estado S.

**H** = Porcentaje de humedad del agregado.

En cuanto a las correcciones por humedad y absorción de los agregados, para determinar el faltante o sobrante de agua de mezclado respecto de la condición de saturado y superficialmente seco, se tiene la siguiente expresión:

$$\boldsymbol{Aa = -Ps\left[\frac{H - CA}{100}\right]} \quad \textbf{(6.22)}$$

Donde:

**Aa** = Agua en exceso o defecto respecto de la condición SSS.

**Ps** = ¨Peso seco del agregado.

**H** = Humedad del agregado.

**CA** = Capacidad de absorción del agregado.

La razón de anteponer un signo negativo a la fórmula indica que cuando la humedad es mayor que la capacidad de absorción, el agregado tiene humedad libre y está aportando agua adicional a la mezcla, por lo cual ésta debe ser sustraída del agua de mezclado. En este caso, el valor de Aa tiene signo negativo. En caso contrario, es decir, cuando la capacidad de absorción es mayor que la humedad, el agregado requiere de agua adicional para terminar de saturarse y llegar a la condición de saturado y superficialmente seco, por lo cual esta debe ser sumada al agua de mezclado, en cuyo caso el valor de Aa tiene signo positivo. Finalmente, es importante notar que si la humedad es igual a la capacidad de absorción (estado SSS) no hay ajustes que hacer. (Sánchez, 2001, p.251)

**Ajustes por mezclas de prueba**

Habiendo estimado las proporciones de todos los ingredientes, el último paso es preparar una mezcla de prueba usando estas cantidades. Para hacer los ajustes pertinentes, el Comité A.C.I – 211 recomienda lo siguiente: “Se deben verificar las proporciones calculadas de la mezcla por medio de mezclas de prueba preparadas y probadas de acuerdo con la norma ASTM C-192 (Fabricación y curado de muestras de concreto para pruebas a presión y a compresión en el laboratorio), o con mezclas de campo de tamaño completo. Sólo debe utilizarse el agua suficiente para producir el asentamiento requerido sin considerar la cantidad supuesta en las proporciones de prueba. Se deber verificar el peso unitario y el rendimiento del concreto (ASTM C-138), C-173 o C-231). También deber observarse cuidadosamente que el concreto posea la trabajabilidad y las propiedades de acabado adecuadas y que esté libre de segregación. Se deberán hacer los ajustes pertinentes, siguiendo el procedimiento indicado a continuación”:

- “Se estima de nuevo la cantidad de agua de mezclado necesaria por metro cúbico de concreto, dividiendo el contenido neto de agua de mezclado de la mezcla de prueba en metros cúbicos.

Si el asentamiento de la mezcla de prueba no fue el correcto, se aumenta o disminuye la cantidad reestimada de agua en 2kg por cada centímetro de aumento o disminución del asentamiento requerido”.

- “Si no se obtuvo el contenido deseado de aire (para concreto con aire incluido), se estima nuevamente el contenido de aditivo requerido para el contenido adecuado de aire y se reduce o aumenta el contenido de agua de mezclado indicado anteriormente en 3 kg/m³ por cada 1% de contenido de aire que deba aumentarse o reducirse de la mezcla de prueba previa”.

- “Si la base para la dosificación es el peso estimado por metro cúbico de concreto fresco, la reestimación de ese peso se obtiene reduciéndole o aumentándole el porcentaje determinado por anticipado de aumento o disminución del contenido de aire de la mezcla, ajustada respecto a la primera mezcla de prueba.”

- “Se calcula los nuevos pesos de la mezcla modificando el volumen de agregado grueso, si es necesario, para obtener una trabajabilidad adecuada.” (Sánchez, 2001, p.252)

# 7 DISEÑO EXPERIMENTAL

Un diseño experimental contiene la metodología utilizada para estimar el tamaño de las muestras, los factores influyentes en el diseño de mezcla junto con el procedimiento especifico que permitirá analizar satisfactoriamente los resultados obtenidos:

## 7.1 ELECCIÓN DE LOS FACTORES, NIVELES Y RANGOS.

Con el propósito de cumplir los objetivos planteados que buscan determinar si el arreglo experimental con la sustitución de ceniza de manera cuenta con las características mínimas de los agregados gruesos y finos para fabricar concreto estructural de 21MPa, se han identificado los siguientes factores de diseño:

• Metodología utilizada para la realización del diseño 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.

• 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.

• Cantidad de ceniza de madera.

Como se puede observar los factores que intervienen en el proceso de adquisición de resistencia de una mezcla de concreto ya sea de peso normal o liviano, se deben principalmente a sus componentes (agua, cemento, agregados, y aditivos), los cuales son controlados a través de la utilización de los ensayos de laboratorio descritos en el cronograma del presente documento, permitiendo así eliminar en gran medida los errores generados por estos. Además de factores ambientales como la humedad natural y temperatura.

La tabla 18 muestra las principales variables que modifican la magnitud de resistencia a la compresión en los diseños de mezcla:

***Tabla 18. Principales causas de variaciones de resistencia***

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

**Factores que se mantienen constantes**

Los factores que se mantendrán constantes en el experimento realizado para determinar si el material utilizado como sustituto parcial del agregado fino (ceniza de madera) en la fabricación de una mezcla de concreto estructural de 21 MPa para los dos arreglos propuestos son los que definen 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 agregado grueso requerido en el diseño de mezcla.

• Cantidad de agua requerida en el diseño de mezcla.

• 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.

• Composición elemental de la ceniza de madera.

**Factores que se permiten variar**

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

• La variación del porcentaje de sustitución de ceniza de madera con la precaución de no exceder considerablemente ya que podría alterar las condiciones de la variable dependiente como lo es la resistencia a la compresión de los cilindros de concreto.

Los factores anteriormente mencionados son los que se variarán en el experimento, ya que, a través de la consulta de la bibliografía, y trabajos de grado relacionados con la elaboración de concreto con ceniza de madera no existe un porcentaje específico ideal para obtener un material 100% confiable, además que en muchos trabajos de grado o investigaciones, la sustitución con ceniza de madera se reemplazaba por el cemento y no hay muchos registros de realizar dicho experimento sustituyendo el agregado fino

**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 que involucra la fabricación de concreto estructural a partir del material granular de peso normal se mencionan a continuación:

• Agregado grueso y agregado fino requerido para el diseño de mezcla.

**No controlables**

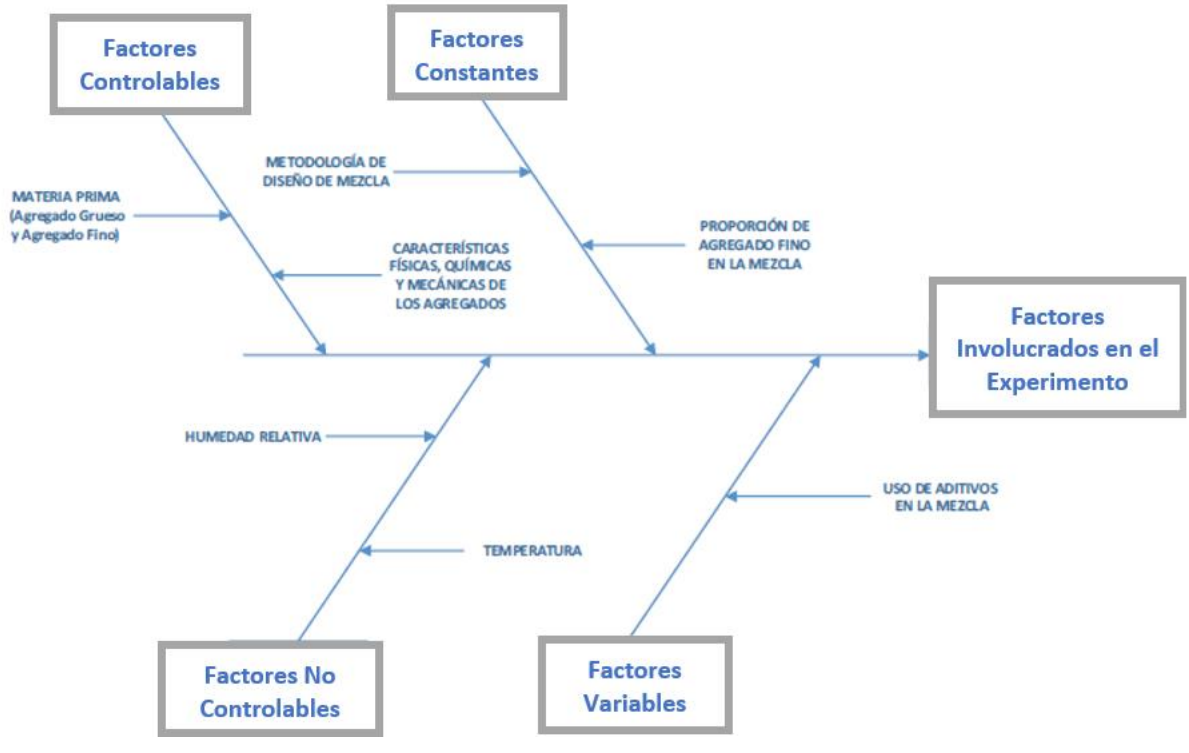
Para el diseño experimental se identificaron los siguientes factores no controlables, que se pueden medir durante la realización de las actividades descritas en el presente informe.

• Humedad relativa.

• Temperatura.

El siguiente diagrama causa efecto, muestra a manera resumida los factores involucrados en el experimento anteriormente mencionados, para el diseño de mezcla de concreto estructural y con ceniza de madera como sustituto parcial del agregado fino.

***Diagrama Causa – Efecto. Factores involucrados en el Diseño Experimental***



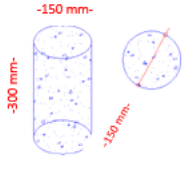
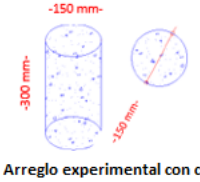

***Fuente: Tomado de. URREGO, Juan David. AYALA, Ismael. Fabricación de concreto liviano de 21 Mpa a partir de roca pómez extraída de Flandes – Tolima. Bogotá, Colombia. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. 2019. 65 P.***

## 7.2 SELECCIÓN DE LA VARIABLE DE RESPUESTA

### Resistencia a la compresión del concreto estructural

Esta variable de respuesta depende principalmente de los componentes de la mezcla de concreto. Cada una de estas muestras cilíndricas será fabricada teniendo en cuenta todos los requerimientos mencionados en las NTC 504, 550 y 1377. Además, se realizará la recolección de información por parte de los estudiantes, Tomando como referencia la NTC 673 (Ensayo para la determinación de resistencia a la compresión en muestras cilíndricas), los tiempos de tolerancia, unidades significativas de medición de la máquina presente en el plantel educativo, además de los posibles sesgos que se puedan generar a causa de factores externos. Teniendo presente el tamaño de la muestra siendo de 6 probetas en total para cada 3 probetas para cada uno de los arreglos, y sabiendo que deben ser fallados en periodos de 7, 14, y 28 días, se someterán a la prueba de resistencia a la compresión.

***Tabla 19.*** ***Resumen de ensayos de resistencia a la compresión para los dos arreglos experimentales***

| CUADRO RESUMEN DE ENSAYOS | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Tiempo de ensayo para desarrollo de resistencia a la compresión en días | 7 días | 14 días | 28 días | Total |
|  Arreglo experimental Estándar | 1 muestra | 1 muestra | 1 muestra | 3 muestras |
|  Arreglo experimental con ceniza de madera como sustituto parcial del agregado fino | 1 muestra | 1 muestra | 1 muestra | 3 muestras |

***Fuente: Elaboración Propia***

## 7.3 REALIZACIÓN DEL EXPERIMENTO

El trabajo de grado denominado “ELABORACIÓN Y DESARROLLO DE CONCRETO ESTRUCTURAL CON CENIZA DE MADERA COMO SUSTITUTO PARCIAL DEL AGREGADO FINO”, se fundamenta en determinar si el arreglo experimental con sustituto de ceniza de madera, logra adquirir una resistencia a la compresión de 21 MPa (Requisito exigido por la normatividad colombiana NSR-10 Título C), en caso contrario este trabajo busca brindar información técnica que incentive a profundizar esta iniciativa de implementar una materia prima sustentable en la industria de la construcción mediante la realización de futuras investigaciones a nivel interinstitucional.

Teniendo presente el objetivo principal, la metodología que abarca el diseño experimental es la siguiente:

**1. Identificación y parámetros para trabajar con un material determinado**

Identificar el material sustituto del agregado fino para elaborar concreto estructural el cual tenga las mismas especificaciones que un concreto elaborado tradicionalmente y que la industria de la construcción requiere según la normatividad vigente además este sea sustentable lo cual permitirá explorar nuevas alternativas para el desarrollo de un material innovador y que reduzca el costo de producción del concreto.

Para ello se determina trabajar con ceniza de madera producto de un asadero local y que será el principal objeto de estudio junto con los agregados tradicionales que constituyen al concreto tradicional.

**2. Selección de cantidad de material destinado a ensayo**

Conociendo el lugar específico en donde se encuentra el material que servirá como sustituto parcial del agregado fino, se procederá a extraer una cantidad de material lo suficientemente grande para satisfacer las necesidades del diseño de mezcla. Se estima que la cantidad de material se acerca a los 20 kg.

**3. Caracterización de las propiedades del material**

Luego depositar el material de estudio para desarrollar el experimento, se le realizó un ensayo para así reconocer la composición química y mineralógica del material llamado fluorescencia de rayos x, realizado en el departamento de Geociencias de la Universidad Nacional con el propósito de caracterizarlo detalladamente para determinar los elementos presentes en la muestra y así tener la seguridad de que este se constituye de componentes compatibles con los elementos que conforman la mezcla de concreto.

**4. Determinación de características físicas y mecánicas de los agregados**

Para reconocer las propiedades físicas y mecánicas del material granular se realizarán una serie de ensayos teniendo en cuenta los procedimientos descritos en la normatividad colombiana INVIAS y NTC.

**5. Diseño de mezcla**

Conociendo las características físicas y mecánicas de los agregados, se realizó el diseño de mezcla (utilizando la norma técnica ACI 211-1), el cual se esperaba que desarrollara unas características de resistencia a la compresión acorde a las requeridas por la normatividad vigente para concreto estructural de 21 Mpa, por lo que a partir de allí se tomó como base inicial de resultados una serie

de muestras las cuales dieron indicios de los factores que se debían modificar en dicho diseño de mezcla para el arreglo experimental estándar y con el sustituto parcial del agregado fino como lo fue la ceniza de madera.

**6. Fabricación del concreto de prueba**

Para identificar las características físicas, mecánicas y el comportamiento en general del agregado, se fundieron probetas de concreto a las cuales posteriormente se le realizaron ensayos de resistencia a la compresión.

**7. Reconocimiento de las características generales del diseño 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 realizaron ensayos de asentamiento y resistencia a la compresión, en donde sus resultados fueron tomados como base para comparar y evaluar el comportamiento de los arreglos experimentales diseñados.

**8. Fabricación del concreto estructural**

En esta etapa se procede a fabricar el concreto estructural teniendo en cuenta las proporciones y cantidades de materiales halladas en el diseño de mezcla, a partir de allí se fundieron probetas para realizar ensayos de resistencia a la compresión teniendo en cuenta la normatividad vigente NTC.

**9. Verificación de resultados**

Se verificó si el concreto fabricado utilizando los agregados y la ceniza de madera como sustituto parcial del agregado fino para el correspondiente arreglo experimental que se quiere trabajar en este trabajo de grado cumple con los requerimientos de densidad y resistencia, además las

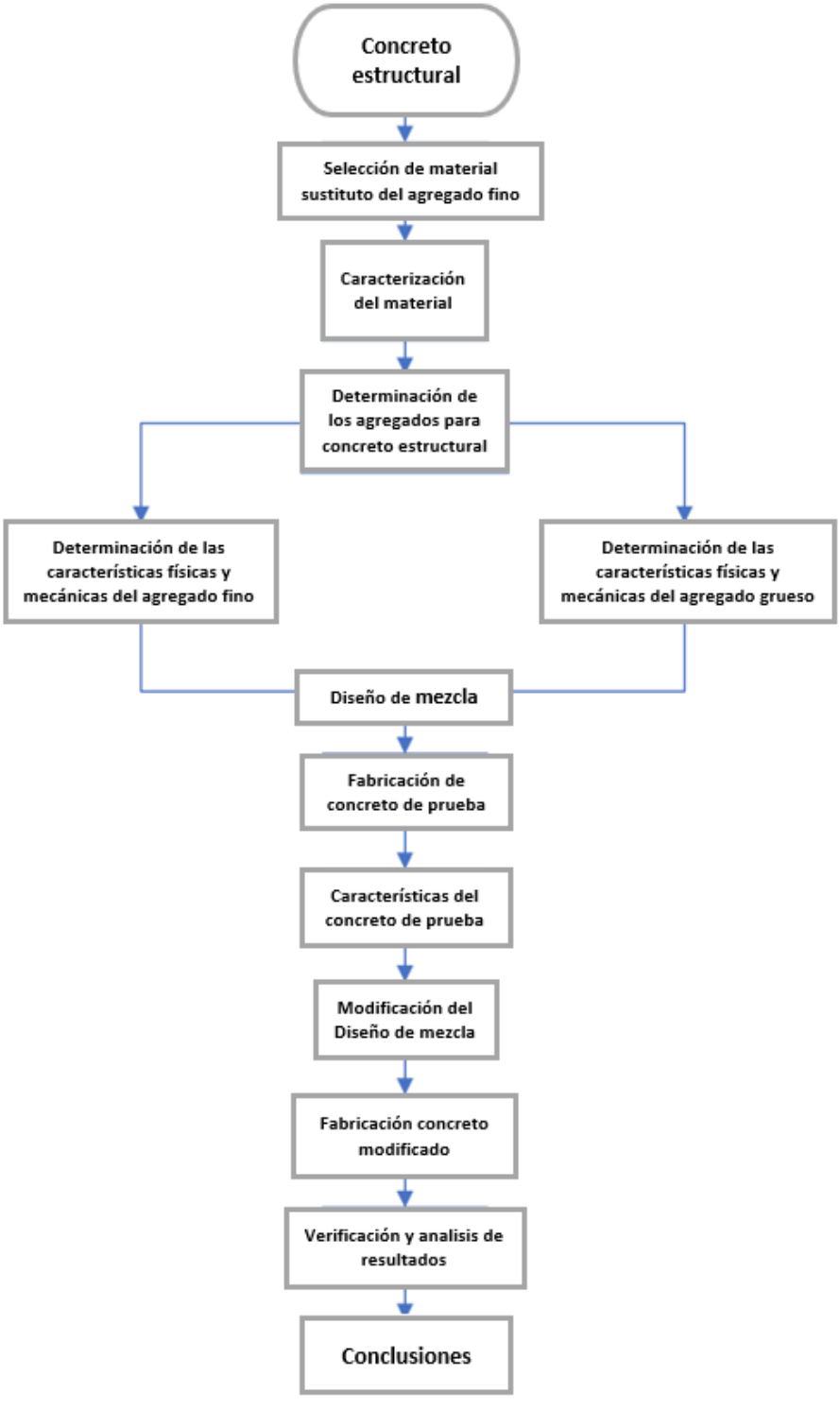
consideraciones finales se agregaron a las respectivas conclusiones que permitirá la apertura a nuevas investigaciones.

## 10. Conclusiones finales

Teniendo en cuenta la información obtenida en las etapas anteriores se determinó si se cumplieron todos los objetivos planteados y que aspectos se deben mejorar para determinar un mejor planteamiento futuro en el desarrollo de nuevas iniciativas para profundizar en este tema.

A continuación, se presenta un diagrama de flujo el cual simplifica cada una de las etapas a realizar en el diseño experimental:

*Proceso metodológico de diseño experimental*




***Fuente: Tomado de. URREGO, Juan David. AYALA, Ismael. Fabricación de concreto liviano de 21 Mpa a partir de roca pómez extraída de Flandes – Tolima. Bogotá, Colombia. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. 2019. 81 P***

# 8 OBTENCIÓN DE MUESTRAS REPRESENTATIVAS

El día 31 de octubre de 2022 el estudiante de Tecnología en Construcciones Civiles Geovanny Mendez se dispuso a recolectar la cantidad necesaria de material ceniza de madera proveniente de un asadero local en la zona de residencia en la ciudad de Bogotá D.C para su posterior almacenamiento lejos de condiciones de humedad e intemperie.

Fotografía 2. ***Recolección de ceniza de madera***



***Fuente: Elaboración Propia***

Fotografía 1. ***Asador utilizado para el proceso de combustión de la madera***



***Fuente: Elaboración Propia***

Fotografía 3. ***Recolección de material ceniza de madera***



***Fuente: Elaboración Propia***

## 8.1 CRONOGRAMA DE ENSAYOS DE LABORATORIO

**Título de trabajo:**

Elaboración y desarrollo de concreto estructural con ceniza de madera como sustituto parcial del agregado fino

**Tutor:** Ing. Milton Mena Serna

**Estudiante:** Geovanny José Mendez Argel

**Código:** 20162379736

Tecnología en Construcciones Civiles

Una vez aceptada la propuesta de monografía por parte del consejo curricular de la universidad Distrital Francisco José de Caldas – Facultad Tecnológica se dispuso a poner en marcha la planificación realizada por parte del estudiante para iniciar con el proceso de investigación y desarrollo del trabajo de grado tecnológico.

***Tabla 20. Cronograma ensayos de laboratorio***

| CRONOGRAMA DE ENSAYOS A REALIZAR | |
|---|---|
| **Ensayo a realizar** | **Fecha de realización** |
| **Caracterización Física** | |
| Análisis Granulométrico | Sábado 22 de abril de 2023 |
| Masas unitarias Agregado grueso y agregado fino | Sábado 22 de abril de 2023 |
| Densidad y Absorción Agregado Grueso | Miercoles 26 de abril de 2023 |
| Densidad y Absorción Agregado Fino | Miercoles 26 de abril de 2023 |
| Indice de Alargamiento y Aplanamiento | Sábado 29 de abril de 2023 |
| **Caracterización Química** | |
| Fluorescencia de rayos x | Sábado 20 de Mayo de 2023 |
| Contenido de materia orgánica | Sábado 20 de Mayo de 2023 |
| **Caracterización Mecánica** | |
| Desgaste en máquina de los ángeles | Miercoles 10 de mayo de 2023 |
| Ensayo Micro Deval | Miercoles 17 de mayo de 2023 |
| **Posterior al Diseño de Mezcla** | |
| Asentamiento del concreto | Miercoles 3 de mayo de 2023 |
| Fundición de probetas cilíndricas | Miercoles 3 de mayo de 2023 |
| Resistencia a la compresión Cilíndros de concreto | Miercoles 10 de mayo de 2023 |
| | Miercoles 17 de mayo de 2023 |
| | Miercoles 31 de mayo de 2023 |

***Fuente: Elaboración Propia***

# 9 CARACTERIZACIÓN FÍSICA

## 9.1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

El ensayo descrito a continuación fue realizado el sábado 22 de abril de 2023 en el Laboratorio de suelos y pavimentos de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de la facultad Tecnológica.

El presente ensayo de análisis granulométrico se realizó teniendo en cuenta los parámetros de las normas técnicas colombianas NTC 77 y 78, con el propósito de determinar la distribución del tamaño de las partículas de una muestra de agregados tanto finos como gruesos para obtener los datos necesarios que requiere el diseño de mezcla de concreto, así como la interpretación de estos.

### MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS

Para la realización del análisis granulométrico del material granular fue necesaria la utilización de los siguientes materiales:

• Juego de tamices de 37 mm, 25.4 mm, 19 mm, 12.5 mm, 9.5 mm, 4.75 mm, 2.36 mm, 1.18 mm, 0.6 mm, 0.3 mm, 0.15 mm, 0.075 mm, y fondo 0 mm, cada uno de los tamices cumple los requerimientos de la norma técnica NTC - 77.

• Balanza con precisión de ± 0.01 g.

• Horno con capacidad de alcanzar y mantener una temperatura de 110 ± 5 °C.

• Recipiente de plástico.

**PROCEDIMIENTO GENERAL DEL ENSAYO**

Se inicia con la selección del tamaño de la muestra de acuerdo con la tabla 21 que suministra la información correspondiente a la NTC 77, la cual dice que el tamaño de la muestra debe ser de mínimo de 5 kg, esto según el tamaño máximo nominal, aunque para tener mayor cantidad de material para analizar se tomó una muestra superior a lo indicado. Luego esta es secada al horno hasta obtener una masa constante y así tener con precisión los porcentajes de material que pasa por cada tamiz.

***Tabla 21.*** ***Masa mínima de muestra para ensayo según tamaño máximo nominal del agregado***

| Tamaño máximo nominal aberturas cuadradas (mm) | Masa mínima Muestra de ensayo (kg) |
|---|---|
| 9,5 | 1 |
| 12,5 | 2 |
| 19,0 | 5 |
| 25,0 | 10 |
| 37,5 | 15 |
| 50,0 | 20 |
| 63,0 | 35 |
| 75,0 | 60 |
| 90,0 | 100 |
| 100,0 | 150 |
| 125,0 | 300 |

***Fuente: Tomado de Norma Técnica Colombiana NTC – 77. Método para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos.***

Una vez secada la muestra en el horno se procede a ensamblar el juego de tamices en orden descendiente de arriba hacia abajo, tomado como referencia la mayor apertura de los tamices, luego se vierte una fracción de la muestra en el tamiz superior. Después, se inicia el proceso de tamizado manual, realizando una serie de movimientos de arriba hacia abajo, golpeando con la mano el conjunto, y a la vez, se agita de izquierda a derecha. Finalizado el proceso de tamizado de material (20 minutos aproximadamente), se pesan las fracciones generadas, registrando cada una de las masas teniendo en cuenta el material depositado en el fondo.

Fotografía 4. ***Proceso de obtención masa del agregado grueso***




***Fuente: Elaboración Propia***

Fotografía 5. ***Proceso de obtención masa del agregado fino***




***Fuente: Elaboración Propia***

Fotografía 6. ***Proceso de tamizado material granular***



***Fuente: Elaboración Propia***

## RESULTADOS OBTENIDOS

Finalmente, los datos obtenidos en la granulometría que se realizó a la muestra de agregado tanto grueso como fino son los siguientes:

***Tabla 22. Datos obtenidos de acuerdo a granulometría agregado grueso***

| | |
|---|---|
| Masa inicial seca (g) | 6436,3 |
| Masa final seca (g) | 6436,3 |
| Tamaño máximo | 3/4" |
| Sumatorias masas retenidas (g) | 6436,3 |
| Fondo después de tamizado (g) | 18,4 |
| Tamaño máximo nominal | 3/4" |

***Fuente: Elaboración Propia***

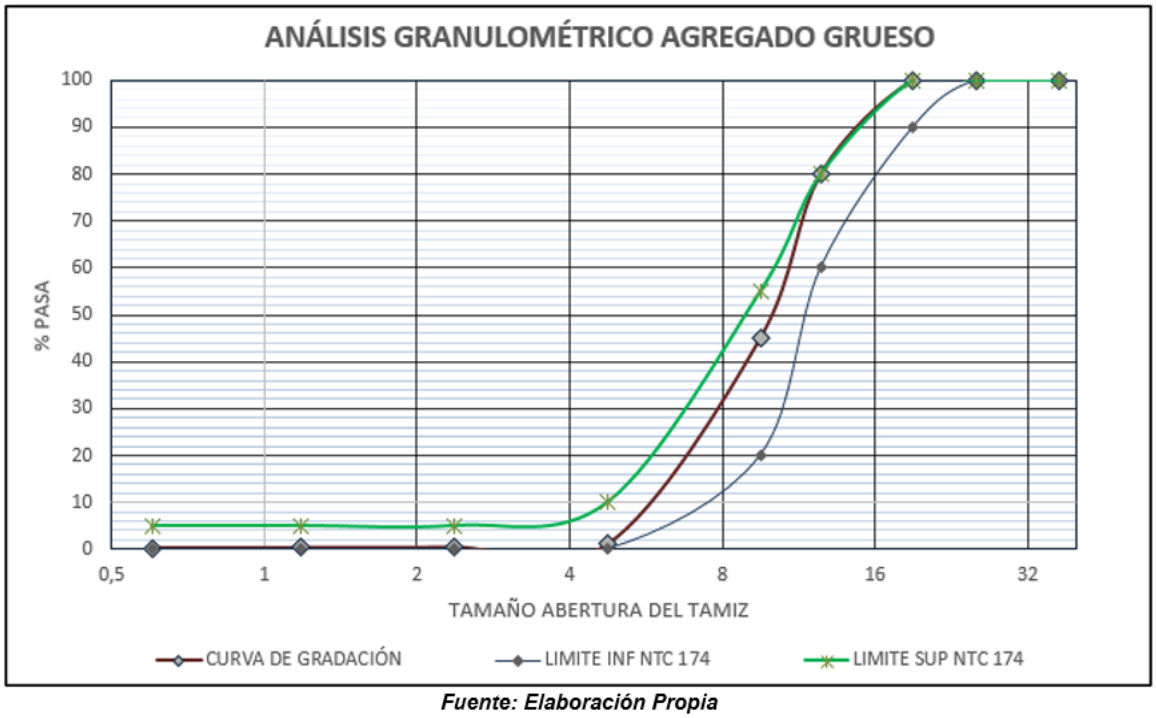
A continuación, se dan a conocer los resultados del análisis granulométrico realizado al agregado grueso y fino con su respectivo gráfico para su interpretación.

***Tabla 23. Analisis granulometrico del agregado fino***

| ANALISIS GRANULOMETRICO AGREGADO GRUESO | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| TAMIZ | TAMAÑO (mm) | MASA RETENIDA (g) | % RETENIDO | % RET ACUMULADO | % PASA | LIMITE INF | LIMITE SUP |
| 1 1/2" | 37 | 0 | 0,00 | 0,00 | 100,00 | 100 | 100 |
| 1" | 25,4 | 0 | 0,00 | 0,00 | 100,00 | 100 | 100 |
| 3/4" | 19 | 0 | 0,00 | 0,00 | 100,00 | 90 | 100 |
| 1/2" | 12,5 | 1283,1 | 19,94 | 19,94 | 80,06 | 0 | 0 |
| 3/8" | 9,5 | 2256,2 | 35,05 | 54,99 | 45,01 | 20 | 55 |
| N° 4 | 4,75 | 2829,7 | 43,96 | 98,95 | 1,05 | 0 | 10 |
| N° 8 | 2,36 | 42,7 | 0,66 | 99,62 | 0,38 | 0 | 5 |
| N° 16 | 1,18 | 4,5 | 0,07 | 99,69 | 0,31 | 0 | 5 |
| N° 30 | 0,6 | 1,7 | 0,03 | 99,71 | 0,29 | 0 | 5 |
| FONDO | | 18,4 | 0,29 | 100,00 | 0,00 | | |
| TOTAL | | 6436,3 | | | | | |

***Fuente: Elaboración Propia***

***Gráfico 7. Curvas correspondientes a limites segun normativa y gradación del agregado grueso***




***Fuente: Elaboración Propia***

## INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Para el agregado grueso se puede observar que cumple con los limites descritos en la norma técnica colombiana NTC 174, además el tamaño máximo nominal y tamaño máximo respectivo es el mismo ya que tanto el tamiz inmediatamente superior a aquel con 15 % o más en el % retenido acumulado como el tamiz menor que permite el 100% pasa es el mismo, es decir ¾".

Para el caso del agregado fino tenemos que:

***Tabla 24.*** ***Datos obtenidos de acuerdo con granulometría agregado fino***

| | |
|---|---|
| **Masa inicial seca (g)** | **5261,8** |
| **Masa final seca (g)** | **5259,8** |
| **Tamaño máximo** | **1/2"** |
| **Sumatorias masas retenidas (g)** | **5259,8** |
| **Fondo después de tamizado (g)** | **1,3** |
| **Tamaño máximo nominal** | **3/8"** |
| **Pasa Tamiz N° 200** | **2,47%** |

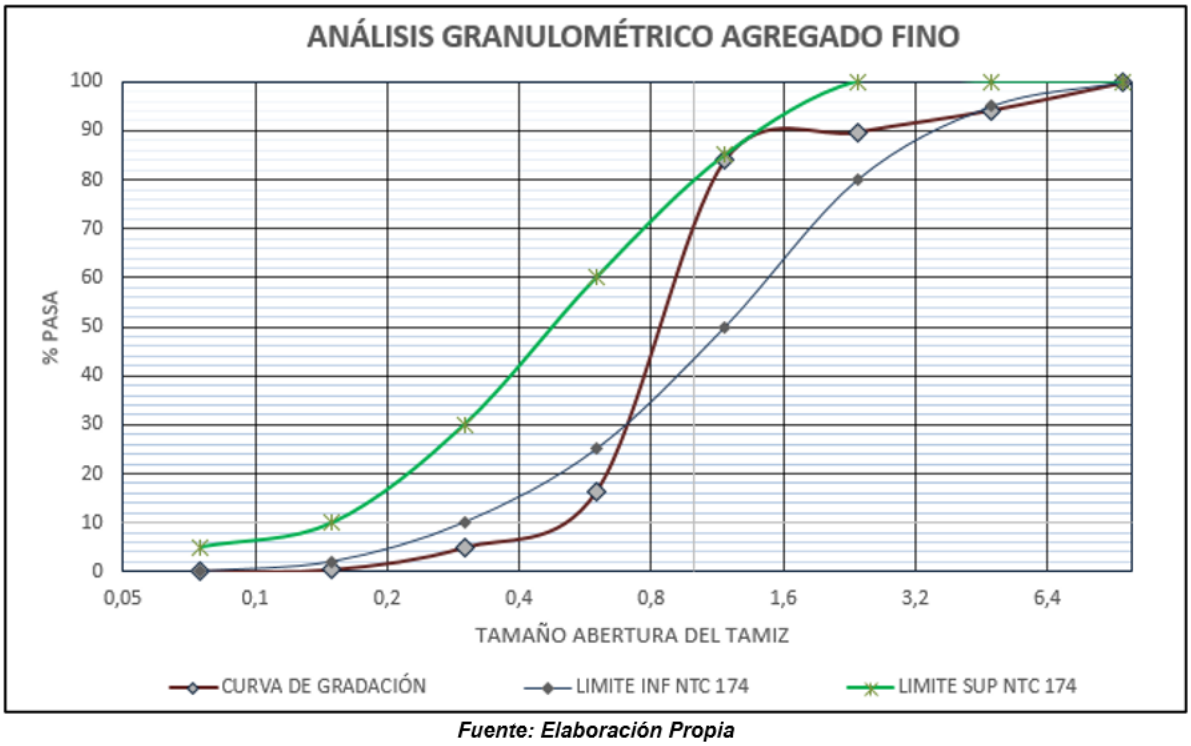
***Fuente: Elaboración Propia***

***Tabla 25.*** ***Analisis granulometrico del agregado fino***

| ANALISIS GRANULOMETRICO AGREGADO FINO | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **TAMIZ** | **TAMAÑO (mm)** | **MASA RETENIDA (g)** | **% RETENIDO** | **% RET ACUMULADO** | **% PASA** | **LIMITE INF** | **LIMITE SUP** |
| **3/8"** | 9,5 | 13,2 | 0,25 | 0,25 | 99,75 | 100 | 100 |
| **N° 4** | 4,75 | 296,2 | 5,63 | 5,88 | 94,12 | 95 | 100 |
| **N° 8** | 2,36 | 232,1 | 4,41 | 10,30 | 89,70 | 80 | 100 |
| **N° 16** | 1,18 | 298,4 | 5,67 | 15,97 | 84,03 | 50 | 85 |
| **N° 30** | 0,6 | 3558,6 | 67,66 | 83,62 | 16,38 | 25 | 60 |
| **N° 50** | 0,3 | 602,6 | 11,46 | 95,08 | 4,92 | 10 | 30 |
| **N°100** | 0,15 | 239,1 | 4,55 | 99,63 | 0,37 | 2 | 10 |
| **N° 200** | 0,075 | 18,3 | 0,35 | 99,98 | 0,02 | 0 | 5 |
| **FONDO** | | 1,3 | 0,02 | 100,00 | 0,00 | | |
| **TOTAL** | | 5259,8 | **MF** | 3,10 | | | |

***Fuente: Elaboración Propia***

*Gráfico 8.* *Curvas correspondientes a limites segun normativa y gradación del agregado fino*




***Fuente: Elaboración Propia***

## INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Para el agregado fino se puede observar que cumple los limites granulométricos según la norma técnica colombiana NTC 174, aunque se presenta una desproporción en los tamices N° 100 y N° 30 los cuales se ajustarán por medio de una optimización por mínimos cuadrados apoyándose en la teoría de Fuller Thompson en el diseño de mezcla. En cuanto al tamaño máximo nominal este es 3/8" y tamaño máximo ½", el 2,47% pasa el tamiz N°200 y su módulo de finura es de 3,1 este último en el límite recomendado para agregados.

## 9.2 MASAS UNITARIAS AGREGADO FINO Y AGREGADO GRUESO

El ensayo descrito a continuación fue realizado el sábado 22 de abril de 2023 en el Laboratorio de suelos y pavimentos de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de la facultad Tecnológica.

El ensayo de masas unitarias realizado para el agregado fino y agregado grueso permite obtener información sobre el posible comportamiento del material en la fabricación del concreto estructural. Este desempeño depende de la relación entre la compactación y volumen de vacíos que presenten los agregados. Para ello se realizan dos procedimientos según sea el caso, para determinar la masa unitaria suelta se realiza por paleo y para determinar la masa unitaria compacta se utiliza el apisonamiento, estos dos dentro de un volumen designado según normatividad NTC 92 “Determinación de la masa unitaria y volumen de vacíos de los agregados”.

### MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS

Para la realización del ensayo de masas unitarias en el agregado grueso y fino se utilizaron los siguientes materiales y equipos:

- 12000 g de grava como agregado grueso
- 5000g de arena como agregado fino
- Balanza con precisión de ± 0.01 g.
- Varilla de apisonamiento lisa y redonda según las especificaciones de la NTC – 92.
- Recipiente metálico cilíndrico de volumen conocido el cual cumple los parámetros descritos en la NTC – 92, según el tamaño máximo nominal de 3/4”.

*Tabla 26.* *Capacidad de moldes para ensayo de masas unitarias a agregados*

| Tamaño máximo nominal de agregado (mm) | Capacidad del molde* | |
|---|---|---|
| | ($m^3$) | (L) |
| 12,5 | 0,002 8 | 2,8 |
| 25,0 | 0,009 3 | 9,3 |
| 37,5 | 0,014 0 | 14,0 |
| 75,0 | 0,028 0 | 28,0 |
| 112,0 | 0,070 0 | 70,0 |
| 150,0 | 0,100 0 | 100,0 |

*Fuente: Tomado de. NTC 92, Determinación de la masa unitaria y los vacios entre partículas de agregados*

*Tabla 27.* *Tabla Requisitos de moldes para ensayo de masas unitarias a agregados*

| Capacidad del molde $m^3$ (L) | Espesor mínimo del metal | | |
|---|---|---|---|
| | Fondo (mm) | *Borde superior de 38 mm de pared (mm) | Resto de pared (mm) |
| menos de 0,011 (11) | 5,0 | 2,5 | 2,5 |
| 0,011 (11) a 0,042 (42) | 5,0 | 5,0 | 3,0 |
| 0,042 (42) a 0,080 (80) | 10,0 | 6,4 | 3,8 |
| 0,080 (80) a 0,133 (133) | 13,0 | 7,6 | 5,0 |

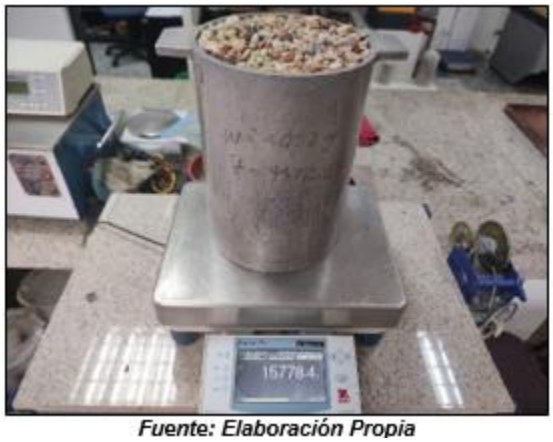
*Fuente: Tomado de. NTC 92, Determinación de la masa unitaria y los vacios entre partículas de agregados*

## PROCEDIMIENTO GENERAL DE ENSAYO

Una vez se realiza el lavado del material, este es secado al horno a una temperatura de ± 110 °C por 24 horas o hasta lograr una masa constante. Luego se realiza la calibración de los recipientes de ensayo según normatividad NTC 92 llenándolos de agua.

De acuerdo con la masa solicitada se realiza un apisonamiento o paleo del material, es decir para obtener la masa suelta del material fino y grueso, este se deja caer al recipiente a una altura determinada (no mayor a 50 mm) hasta cubrir el volumen de este, ya para obtener la masa unitaria compacta se realiza un apisonamiento del material por capa (3 en total) realizando un apisonamiento de 25 veces por capa y enrasando la capa final con la varilla de compactación. Finalmente se realizan los cálculos pertinentes de acuerdo con la normatividad.

Fotografía 7. ***Proceso de determinación de masa material granular***



*Fuente: Elaboración Propia*

Fotografía 8. ***Proceso de determinación de masa material granular***



*Fuente: Elaboración Propia*

Teniendo en cuenta que la densidad del agua es de 1000kg/m³, se procede a calcular las masas unitarias de los materiales en estado suelto y compacto de acuerdo con la normativa NTC 92.

$$\boldsymbol{M = \frac{(G - T)}{V}} \quad \textbf{(9.1)}$$

Donde:

$\boldsymbol{M}$ = masa unitaria del agregado en (kg/m³).

$G$ = masa del agregado más el molde (kg).

$\boldsymbol{T}$ = masa del molde.

$\boldsymbol{V}$ = volumen del molde (m³).

**RESULTADOS OBTENIDOS**

Luego de realizar el ensayo de masas unitarias en los agregados finos y gruesos se obtuvieron los siguientes resultados:

*Tabla 28.* ***Resultados obtenidos luego del ensayo de masa unitaria suelta del agregado grueso***

| Masa Unitaria suelta agregado grueso | | | | |
|---|---|---|---|---|
| muestra | 1 | 2 | 3 | Promedio |
| peso del recipiente (Kg) | 4,039 | 4,039 | 4,039 | 4,039 |
| peso muestra seca + recipiente (Kg) | 15,7785 | 15,9234 | 15,9251 | 15,876 |
| peso muestra seca (Kg) | 11,7395 | 11,8844 | 11,8861 | 11,837 |
| volumen del recipiente (m3) | 0,0095 | 0,0095 | 0,0095 | 0,009 |
| Masa Unitaria (Kg/m3) | 1242,275 | 1257,608 | 1257,788 | 1252,557 |

*Fuente: Elaboración Propia*

*Tabla 29.* ***Resultados obtenidos luego del ensayo de masa unitaria compacta del agregado grueso***

| Masa Unitaria compacta agregado grueso | | | | |
|---|---|---|---|---|
| muestra | 1 | 2 | 3 | Promedio |
| peso del recipiente (Kg) | 4,039 | 4,039 | 4,039 | 4,039 |
| peso muestra seca + recipiente (Kg) | 15,9889 | 16,3874 | 16,0666 | 16,148 |
| peso muestra seca (Kg) | 11,9499 | 12,3484 | 12,0276 | 12,109 |
| volumen del recipiente (m3) | 0,0095 | 0,0095 | 0,0095 | 0,009 |
| Masa Unitaria (Kg/m3) | 1264,540 | 1306,709 | 1272,762 | 1281,337 |

*Fuente: Elaboración Propia*

*Tabla 30.* ***Resultados obtenidos luego del ensayo de masa unitaria suelta del agregado fino***

| Masa Unitaria suelta agregado Fino | | | | |
|---|---|---|---|---|
| muestra | 1 | 2 | 3 | Promedio |
| peso del recipiente (Kg) | 5,579 | 5,579 | 5,579 | 5,579 |
| peso muestra seca + recipiente (Kg) | 9,6231 | 9,6286 | 9,6486 | 9,633 |
| peso muestra seca (Kg) | 4,0441 | 4,0496 | 4,0696 | 4,054 |
| volumen del recipiente (m3) | 0,0029 | 0,0029 | 0,0029 | 0,003 |
| Masa Unitaria (Kg/m3) | 1411,425 | 1413,345 | 1420,325 | 1415,032 |

*Fuente: Elaboración Propia*

*Tabla 31.* *Resultados obtenidos luego del ensayo de masa unitaria compacta del agregado fino*

| Masa Unitaria compacta agregado Fino | | | | |
|---|---|---|---|---|
| muestra | 1 | 2 | 3 | Promedio |
| peso del recipiente (Kg) | 5,579 | 5,579 | 5,579 | 5,579 |
| peso muestra seca + recipiente (Kg) | 9,7427 | 9,8006 | 9,8147 | 9,786 |
| peso muestra seca (Kg) | 4,1637 | 4,2216 | 4,2357 | 4,207 |
| volumen del recipiente (m3) | 0,0029 | 0,0029 | 0,0029 | 0,003 |
| Masa Unitaria (Kg/m3) | 1453,167 | 1473,374 | 1478,295 | 1468,279 |

*Fuente: Elaboración Propia*

## INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

De acuerdo con los resultados obtenidos podemos inferir que a mayor masa mayor densidad por lo que el material al ser compactado tiene mayor reducción en el volumen de vacíos y registra mayor masa unitaria para cada material en comparación con el ensayo para determinar la masa unitaria suelta de los agregados.

## 9.3 DENSIDAD Y ABSORCIÓN EN AGREGADOS GRUESOS

El ensayo descrito a continuación fue realizado el sábado 26 de abril de 2023 en el Laboratorio de suelos y pavimentos de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de la facultad Tecnológica.

Este ensayo es realizado con el objetivo de determinar la densidad y absorción del agregado grueso tomando como referencia la Norma Técnica Colombiana NTC 176. Los datos obtenidos durante el ensayo son de suma importancia para la realización del diseño de mezcla, ya que a partir de la información obtenida se calcularán y estimarán las proporciones necesarias de los agregados para la fabricación del concreto estructural. Por su parte el porcentaje de absorción nos brinda un indicativo sobre la cantidad de agua ocluida a nivel interno en el agregado que ayudará a realizar la corrección por humedad en el diseño de mezcla, es decir corregir la cantidad de agua requerida y así lograr el desarrollo de resistencia en la mezcla.

### MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS

Para el ensayo de densidad y absorción del agregado grueso fue necesario utilizar los siguientes materiales y equipos:

- 3000 g de grava como agregado grueso con un tamaño máximo de 3/4’’.
- Balanza con precisión de ± 0.01 g.
- Juego de tamiz N°4 (4.75 mm).
- Horno con capacidad de alcanzar y mantener una temperatura de 110 ± 5 °C.
- Canasta de alambre con apertura de 4 mm.

- Recipiente de plástico con capacidad de 4L, en donde se colocará la muestra de agregado grueso en condición saturada superficialmente seca.
- Bayetilla para secado del material hasta alcanzar estado saturado superficialmente seco.

**PROCEDIMIENTO GENERAL DEL ENSAYO**

La norma técnica colombiana NTC 176 "Método para determinar la densidad y absorción del agregado grueso" menciona los siguientes conceptos:

**Densidad nominal:** La relación entre la masa en el aire de un volumen dado de agregado, incluyendo los poros no saturables y la masa de un volumen igual de agua destilada libre de gas a una temperatura establecida.

**Densidad aparente:** La relación entre la masa en el aire de un volumen dado de agregado, incluyendo sus poros saturables y no saturables (sin incluir los vacíos entre partículas), y la masa de un volumen igual de agua destilada libre de gas a una temperatura establecida.

**Densidad aparente (SSS):** La relación entre la masa en el aire de un volumen dado de agregado, incluyendo la masa del agua dentro de los poros saturables, (después de la inmersión en agua durante aproximadamente 24 h), pero sin incluir los vacíos entre partículas, comparado con la masa de un volumen de agua destilada libre de gas a una temperatura establecida.

Se inicia con el tamizado de la muestra sobre la apertura de 4.75 mm, eliminando así el material fino que esté presente, luego es lavado y secado al horno a una temperatura de 110 ± 5 °C. Posterior a ello se selecciona el tamaño de la muestra de acuerdo a lo establecido en la NTC 176, sabiendo que su tamaño máximo nominal es de 3/4":

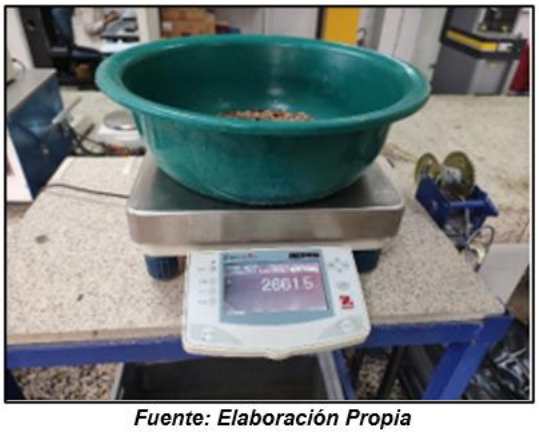
***Masa mínima de las muestras de agregado grueso para ensayo de densidad y absorción***

| Tamaño nominal, mm | Masa mínima de la muestra de ensayo, kg |
|---|---|
| 12,5 ó menos | 2 |
| 19,0 | 3 |
| 25,0 | 4 |
| 37,5 | 5 |
| 50 | 8 |
| 63 | 12 |
| 75 | 18 |
| 90 | 25 |
| 100 | 40 |
| 112 | 50 |
| 125 | 75 |
| 150 | 125 |

***Fuente: Tomado de Norma Técnica Colombiana, NTC 176 – Método de ensayo para determiner la densidad y la absorción del agregado grueso***

Posteriormente el material una vez seco es sumergido en agua destilada a una temperatura ambiente por un periodo no menor de 24 horas. Pasado este tiempo la muestra fue secada superficialmente a través del uso de telas o bayetillas (toallas), hasta eliminar por completo su humedad superficial, cuidando de no eliminar la humedad interna del material para así alcanzar la condición saturada superficialmente seca (SSS) se registra su masa.

Fotografía 10. ***Proceso de determinación de masa material granular***



***Fuente: Elaboración Propia***

Fotografía 9. ***Masa material granular en canasta de suspensión***



***Fuente: Elaboración Propia***

En esta condición el agregado se coloca en la canasta metálica para luego ser sumergido completamente en el recipiente de plástico previamente llenado con agua destilada a temperatura ambiente, registrando así el peso del material en esta condición. Cabe resaltar que se eliminó el contenido de aire de las partículas sacudiendo suavemente la canasta mientras se encontraba en inmersión hasta asegurarse de que ninguna de las partículas flotaba, lo que garantizó que se eliminó por completo el contenido de aire interno del material asegurando el llenado de cada uno de los conductos.

Por último, la muestra de agregado es secada al horno a una temperatura de 110° ± 5 °C, se enfría hasta alcanzar la temperatura ambiente y por último se registra su peso.

**RESULTADOS OBTENIDOS**

Una vez se realiza el procedimiento anterior para conocer la masa del material en estado SSS, sumergido en agua y secado al horno nos queda registrar cada una de ellas de la siguiente manera:

$$A = Masa\ Muestra\ Seca = 2.461{,}1\ g$$

$$B = Masa\ al\ Aire\ Muestra\ SSS = 2.661{,}5\ g$$

$$C = Masa\ en\ el\ Agua\ de\ la\ Muestra = 1.519\ g$$

Después, se procede a calcular cada una de las densidades nominal, aparente, y aparente (SSS) según normatividad NTC 176.

$$\boldsymbol{Densidad\ Aparente} = \frac{\boldsymbol{A}}{\boldsymbol{B - C}} \quad \textbf{(9.2)}$$

$$\textbf{Densidad Aparente} = \frac{\textbf{A}}{\textbf{B} - \textbf{C}} = \frac{\textbf{2.461,1}}{\textbf{2.661,5} - \textbf{1.519}} = \textbf{2.15}\ \boldsymbol{g/cm^3}$$

$$\boldsymbol{Densidad\ Aparente\ (SSS)} = \frac{\boldsymbol{B}}{\boldsymbol{B - C}} \quad \textbf{(23)}$$

$$\textbf{Densidad Aparente (SSS)} = \frac{\textbf{B}}{\textbf{B} - \textbf{C}} = \frac{\textbf{2.661,5}}{\textbf{2.661,5} - \textbf{1.519}} = \textbf{2.33}\ \boldsymbol{g/cm^3}$$

$$\textbf{Densidad Nominal} = \frac{\textbf{A}}{\textbf{A} - \textbf{C}} \quad \textbf{(24)}$$

$$\textbf{Densidad Nominal} = \frac{\textbf{A}}{\textbf{A} - \textbf{C}} = \frac{\textbf{2.461,1}}{\textbf{2.461,1} - \textbf{1.519}} = \textbf{2.61}\ \boldsymbol{g/cm^3}$$

Finalmente, para calcular la absorción de agregado grueso se tiene que:

$$\textbf{Absorción}\ (\%) = \frac{\textbf{B} - \textbf{A}}{\textbf{A}} * \textbf{100} \quad \textbf{(25)}$$

$$\textbf{Absorción}\ (\%) = \frac{\textbf{B} - \textbf{A}}{\textbf{A}} * \textbf{100} = \left[\frac{\textbf{2.661,5} - \textbf{2.461,1}}{\textbf{2.461,1}}\right] * \textbf{100} = \textbf{8,1}\%$$

## INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Finalmente se puede observar que la absorción del agregado grueso es sumamente elevada alcanzando el 8%, ya que la absorción de agregados gruesos normales no sobrepasa el 3%. Esto es posible debido que gran parte del material posee pequeñas partículas de concreto y ladrillo en la

muestra por ser grava reciclada que influye en la capacidad de absorción de agua en estado de inmersión, por lo cual esta información se tendrá en cuenta para realizar la corrección de cantidad de agua en el diseño de mezcla cuando se realice por humedad interna.

Mientras que las densidades registran valores normales a un material aceptable para la elaboración de concreto estructural.

Fotografía 11. ***Material granular secado en el horno para determinar masa final***



***Fuente: Elaboración Propia***

***Tabla 32. Resultados obtenidos luego del ensayo de densidad y absorción para el agregado grueso***

| DATOS OBTENIDOS DURANTE EL ENSAYO | |
|---|---|
| Masa de la muestra seca, A (g) | 2.461,1 |
| Masa de la muestra al aire (SSS), B (g) | 2.661,5 |
| Masa de la muestra sumergida en agua, C (g) | 1.519 |
| Densidad Aparente (g/cm3) | 2.15 |
| Densidad Aparente SSS (g/cm3) | 2.33 |
| Densidad Nominal (g/cm3) | 2.61 |
| Absorción (%) | 8.1 |

***Fuente: Elaboración Propia***

## 9.4 DENSIDAD Y ABSORCIÓN EN AGREGADOS FINOS

El ensayo descrito a continuación fue realizado el sábado 26 de abril de 2023 en el Laboratorio de suelos y pavimentos de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de la facultad Tecnológica.

Este ensayo es realizado con el objetivo de determinar la densidad y absorción del agregado fino tomando como referencia la Norma Técnica Colombiana NTC 237.

Los datos obtenidos durante el ensayo son de suma importancia para la realización del diseño de mezcla, ya que a partir de la información obtenida se calcularán y estimarán las proporciones necesarias de los agregados para la fabricación del concreto estructural. Por su parte el porcentaje de absorción nos brinda un indicativo sobre la cantidad de agua ocluida a nivel interno en el agregado que ayudará a realizar la corrección por humedad en el diseño de mezcla, es decir corregir la cantidad de agua requerida y así lograr el desarrollo de resistencia en la mezcla.

### MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS

Para el ensayo de densidad y absorción del agregado fino fue necesario utilizar los siguientes materiales y equipos:

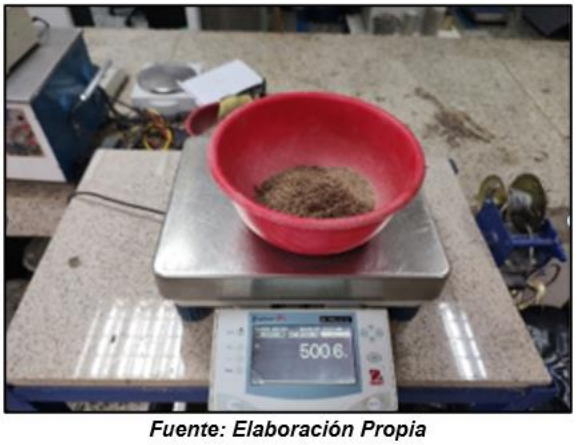
- 2000 g de arena de peña como agregado fino.
- Balanza con precisión de ± 0.01 g.
- Horno con capacidad de alcanzar y mantener una temperatura de 110 ± 5 °C.
- Recipiente metálico.
- Molde tronco cónico que cumple las especificaciones establecidas por la NTC 237.
- Picnómetro con capacidad de 500 ml.

- Pisón metálico con superficie de apisonamiento plana con masa de 340 g.
- Dispositivo generador de aire caliente (Secador).
- Bandeja metálica que permita extender satisfactoriamente el material.
- Espátula.
- Máquina reguladora de temperatura (baño de maría).

**PROCEDIMIENTO GENERAL DEL ENSAYO**

Para preparar la muestra de ensayo se toman los 2000 g de material los cuales son secados al horno a una temperatura de 110 ± 5°C por un periodo de 24 horas. Luego de pasado este tiempo, se toman 1000 g de material colocándolos dentro de un recipiente con agua por un periodo de 24 horas para así asegurar la mayor absorción. Preparada la muestra para ensayo, se elimina el agua del recipiente y es extendida en una bandeja metálica para utilizar el secador hasta que alcance la condición de SSS (material saturado superficialmente seco). Esta condición se obtiene al llenar con material el molde cónico, colocando su diámetro mayor sobre la superficie de la bandeja, el cual se llena completamente asegurando que el material rebose el borde superior, luego, debe ser apisonado con 25 golpes desde una altura no mayor a 5 mm desde la superficie del molde, cabe resaltar que el pisón debe dejarse caer libremente, el proceso se repite hasta llenar por completo el molde cónico. Se dice que se alcanzó la condición saturada superficialmente seca cuando el material se desmorona ligeramente, luego de retirar el molde, de no ser así el proceso de llenado se repite hasta alcanzar dicha condición.

Fotografía 12. ***Determinación de masa de material fino***




***Fuente: Elaboración Propia***

***Material granular fino en molde cónico para determinar condición SSS***



***Fuente: Elaboración Propia***

Fotografía 13. ***Material granular fino en condición SSS***

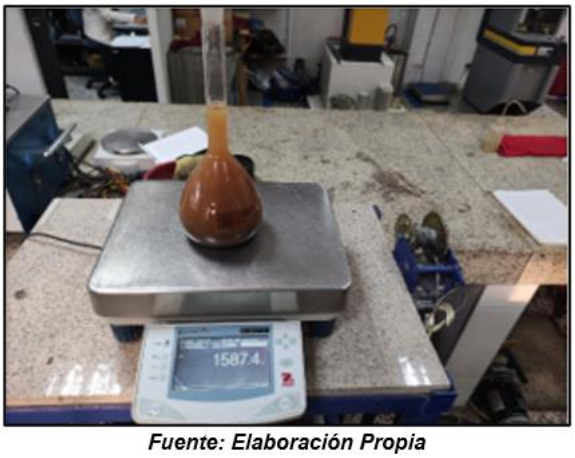


***Fuente: Elaboración Propia***

Posteriormente se llena el picnómetro con agua a temperatura ambiente hasta su capacidad de calibración (Es decir hasta donde lo permite su corcho), tomando la masa del conjunto, luego se retira una cantidad de agua del picnómetro de tal manera que permita adicionar una masa de material fino de 500 g en condición SSS con ayuda de un embudo, paso siguiente, se llena de nuevo el recipiente con agua hasta su capacidad de calibración, registrando el peso del conjunto. (es de gran importancia que el agua se encuentre a una temperatura de 23°C. Finalmente se vierte el material junto con el agua en un recipiente metálico, cuidando de no dejar depositada ninguna partícula en el picnómetro, luego este es secado en el horno a una temperatura de 110 ± 5 °C por

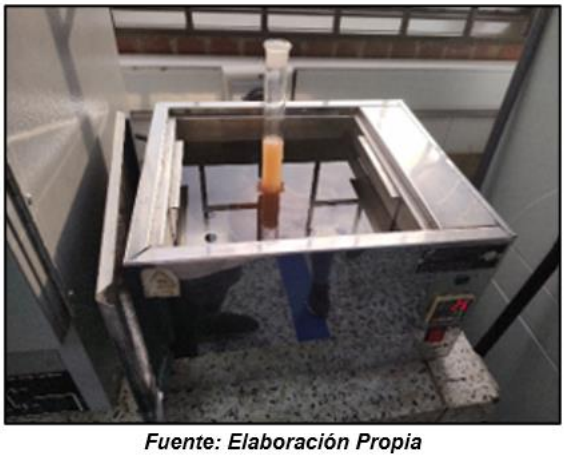
24 horas, pasado este tiempo es registrada su masa seca final para realizar por último los cálculos que nos permitan conocer las densidades y absorción correspondientes.

Fotografía 15. ***Picnómetro + material granular fino en condición SSS***




***Fuente: Elaboración Propia***

Fotografía 14. ***Material granular fino en baño de maría para regular temperatura***



***Fuente: Elaboración Propia***

Durante el ensayo se obtuvieron los siguientes datos para la realización de los cálculos correspondientes:

***Tabla 33. Resultados obtenidos en ensayo de denstidad del material granular fino***

| DATOS OBTENIDOS DURANTE EL ENSAYO | |
|---|---|
| **Masa de la muestra seca, A (g)** | 486,3 |
| **Masa picnómetro + agua, B (g)** | 1.283,4 |
| **Masa picnómetro + agua + material, C (g)** | 1.587,4 |
| **Masa del material en condición (SSS), S (g)** | 500,6 |

***Fuente: Elaboración Propia***

Las densidades se calcularon utilizando las siguientes expresiones:

Densidad aparente (Calculada con agua a la temperatura de 23°C)

$$\boldsymbol{Densidad\ Aparente} = \mathbf{1} * \frac{\boldsymbol{A}}{(\boldsymbol{B} + \boldsymbol{S} - \boldsymbol{C})} \quad \textbf{(26)}$$

$$\textbf{Densidad Aparente} = 1 * \frac{\mathbf{A}}{(\mathbf{B} + \mathbf{S} - \mathbf{C})} = \frac{\mathbf{486,3}}{(\mathbf{1.283.4} + \mathbf{500.6} - \mathbf{1.587.4})} = \mathbf{2,47}\ \boldsymbol{g/cm^3}$$

Densidad aparente (Base saturada y superficialmente seca)

$$\textbf{Densidad Base SSS} = 1 * \frac{\mathbf{S}}{(\mathbf{B} + \mathbf{S} - \mathbf{C})} \quad \textbf{(27)}$$

$$\textbf{Densidad Base SSS} = 1 * \frac{\mathbf{S}}{(\mathbf{B} + \mathbf{S} - \mathbf{C})} = \frac{\mathbf{500,6}}{(\mathbf{1.283.4} + \mathbf{500,6} - \mathbf{1.587,4})} = \mathbf{2,55}\ \boldsymbol{g/cm^3}$$

Densidad nominal

$$\textbf{Densidad Nominal} = 1 * \frac{\mathbf{A}}{(\mathbf{B} + \mathbf{A} - \mathbf{C})} \quad \textbf{(28)}$$

$$\textbf{Densidad Nominal} = 1 * \frac{\mathbf{A}}{(\mathbf{B} + \mathbf{A} - \mathbf{C})} = \frac{\mathbf{486,3}}{(\mathbf{1.283,4} + \mathbf{486,3} - \mathbf{1.587,4})} = \mathbf{2,67}\ \boldsymbol{g/cm^3}$$

Absorción

$$\textbf{Absorción}\ (\%) = \frac{\mathbf{S} - \mathbf{A}}{\mathbf{A}} * \mathbf{100} \quad \textbf{(29)}$$

$$\textbf{Absorción}\ (\%) = \frac{\mathbf{S} - \mathbf{A}}{\mathbf{A}} * \mathbf{100} = \left[\frac{\mathbf{500,6} - \mathbf{486,3}}{\mathbf{486.3}}\right] * \mathbf{100} = \mathbf{2,94}\ \%$$

## RESULTADOS OBTENIDOS

Una vez realizado los cálculos correspondientes según normatividad NTC 237 del ensayo de densidad y absorción en el agregado fino se obtuvieron los siguientes resultados:

*Tabla 34. Denstidades finales y absorción del material agregado fino*

| RESULTADOS OBTENIDOS DURANTE EL ENSAYO | |
|---|---|
| Densidad Aparente (g/cm3) | 2,47 |
| Densidad Aparente SSS (g/cm3) | 2,55 |
| Densidad Nominal (g/cm3) | 2,67 |
| Absorción (%) | 2,94 |

*Fuente: Elaboración Propia*

**INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS**

Según los resultados obtenidos se concluye que tanto las densidades como la absorción están dentro de los parámetros para agregados finos ya que estos no superan el 3 %. Es un material que no incluye agua en exceso dentro de sus poros lo cual es bastante favorable para el diseño de mezcla además que no requiere mayor control para la corrección por humedad.

## 9.5 HÚMEDAD NATURAL DEL AGREGADO GRUESO Y FINO

El ensayo descrito a continuación fue realizado el sábado 6 de mayo de 2023 en el Laboratorio de suelos y pavimentos de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de la facultad Tecnológica.

Este ensayo es realizado con el objetivo de determinar el porcentaje de humedad evaporable en una muestra de agregado tanto fino como grueso secado. Este ensayo se realizó tomando como referencia la Norma Técnica Colombiana NTC 1776. Los datos obtenidos durante el ensayo son de suma importancia para realizar la corrección por humedad en el diseño de mezcla, es decir corregir la cantidad de agua requerida y así lograr el desarrollo de resistencia en la mezcla.

### MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS

Para el ensayo de humedad del agregado fino y grueso fue necesario utilizar los siguientes materiales y equipos:

- +4000 g de arena de peña como agregado fino.
- +4000 g de grava como agregado grueso.
- Balanza con precisión de ± 0.01 g.
- Horno con capacidad de alcanzar y mantener una temperatura de 110 ± 5 °C.
- Recipiente metálico y plástico.

## PROCEDIMIENTO GENERAL DEL ENSAYO

Una vez se tiene el material en condición húmeda con las especificaciones de la masa de la muestra de acuerdo a la normatividad NTC 1776 en cuanto a su tamaño máximo nominal es pesado para posteriormente secarlo al horno a una temperatura de 110 ± 5°C por 24 horas para finalmente tomar su masa seca final.

***Tabla 35.*** ***Masa mínima para ensayo de humedad en agregados***

| Tamaño máximo nominal del agregado (mm)[A] | Masa mínima de la muestra (kg)[B] |
|---|---|
| 4,75 | 0,5 |
| 9,50 | 1,5 |
| 12 | 2 |
| 19 | 3 |
| 25 | 4 |
| 37 | 6 |
| 50 | 8 |
| 63 | 10 |
| 75 | 13 |
| 90 | 16 |
| 100 | 25 |
| 150 | 50 |

***Fuente: Tomado de norma técnica colombiana – NTC 1776. "Método de ensayo para determinar por secado el contenido total de humedad de los agregados".***

***Fotografía 17. Masa en condición de humedad natural agregado grueso***




***Fuente: Elaboración Propia***

Fotografía 16. ***Masa en condición de humedad natural agregado fino***



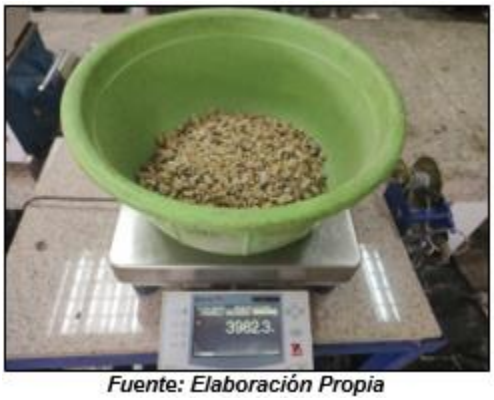

***Fuente: Elaboración Propia***

Fotografía 17. ***Proceso de secado en horno material granular***



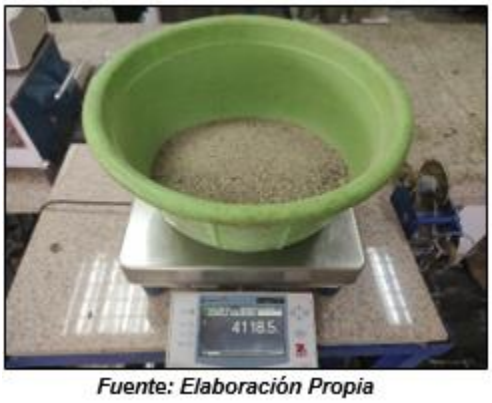
***Fuente: Elaboración Propia***

Fotografía 18. ***Masa final o seca del agregado grueso***



***Fuente: Elaboración Propia***

Fotografía 19. ***Masa final o seca del agregado fino***



***Fuente: Elaboración Propia***

Para obtener el porcentaje de humedad natural de los agregados tomados para el respectivo ensayo se realizaron los cálculos emitidos por la norma técnica colombiana NTC 1776.

$$\%\ \boldsymbol{Humedad\ Natural}\ (\boldsymbol{W})\ = \frac{\boldsymbol{H - S}}{\boldsymbol{S}} * \mathbf{100} \quad \mathbf{(9.10)}$$

Donde:

**W** = Contenido de humedad de la muestra, en porcentaje.

**H**= Masa inicial de la muestra, en gramos.

**S** = Masa final de la muestra, en gramos.

Para el agregado grueso tenemos que:

$$\%\ \boldsymbol{Humedad\ Natural}\ (\boldsymbol{W}) = \frac{\mathbf{4.167,1 - 3.982,3}}{\mathbf{3.982,3}} * \mathbf{100} = \mathbf{4,64}\%$$

Para el agregado fino tenemos que:

$$\%\ \boldsymbol{Humedad\ Natural}\ (\boldsymbol{W}) = \frac{\mathbf{4.307,4 - 4.118,5}}{\mathbf{4.118,5}} * \mathbf{100} = \mathbf{4,59}\%$$

**INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS**

De acuerdo con los datos obtenidos durante el ensayo para determinar el porcentaje de humedad natural en los agregados fino y gruesos se puede establecer que para el material granular grueso el porcentaje es superior al 3% por lo cual el agregado contiene un nivel superior en su estado natural proveniente de la cantera u origen aluvial, mientras que el material fino es inferior al 8%, es decir se encuentra en condiciones normales de humedad natural.

Estos valores se tomarán en cuenta para el diseño de mezcla en la respectiva corrección de humedad para determinar la cantidad de agua efectiva en la mezcla de concreto estructural.

## 9.6 ÍNDICE DE ALARGAMIENTO Y APLANAMIENTO

El ensayo descrito a continuación fue realizado el sábado 29 de abril de 2023 en el Laboratorio de suelos y pavimentos de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de la facultad Tecnológica.

El objetivo de realizar este ensayo es identificar en una muestra el porcentaje de partículas planas y alargadas que presenta, características muy importantes para el desarrollo de la resistencia del concreto estructural ya que lo ideal en un material granular es contar con partículas de formas redondas o cúbicas. Estas partículas permiten una mayor compactación a la hora de someter un elemento estructural a esfuerzos de compresión debido a que esta fallará a través de su dimensión más débil. El presente ensayo fue realizado de acuerdo con los parámetros establecidos en la norma I.N.V. E-230-12.

### MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS

En el ensayo de índices de alargamiento y aplanamiento fue necesario utilizar los siguientes materiales y equipos:

- Juego de tamices de las siguientes aperturas 6.35 mm (1/4”), 9.5 mm (3/8”), 12.5 mm (1/2”), 19 mm (3/4”), 25 mm (1”), 37 mm (1 ½”).
- Tamiz de barras de acuerdo con la norma I.N.V.E-230 – 12.
- Calibradores metálicos. Un calibrador de ranuras (para espesores) y otro de barras (calibrador de longitudes), ambos de acuerdo con los requerimientos de la norma para ensayo I.N.V.E-230-12.

• Horno con capacidad de alcanzar y mantener una temperatura de 110 ± 5 °C.

• Balanza con precisión de ± 0.01 g.

• +5000 g de agregado grueso (grava).

**PROCEDIMIENTO GENERAL DEL ENSAYO**

Una vez se tiene el material lavado y secado al horno a una temperatura de 110 ± 5°C por 24 horas para la realización del ensayo, se procede a tamizar una muestra fraccionada que supera los 5000 g tal y como lo indica la tabla, teniendo en cuenta que el tamaño máximo nominal hallado a través de la granulometría es de 19 mm (3/4"). Luego fue pesado el material retenido en cada uno de los tamices para iniciar con el procedimiento con los calibradores de alargamiento y aplanamiento.

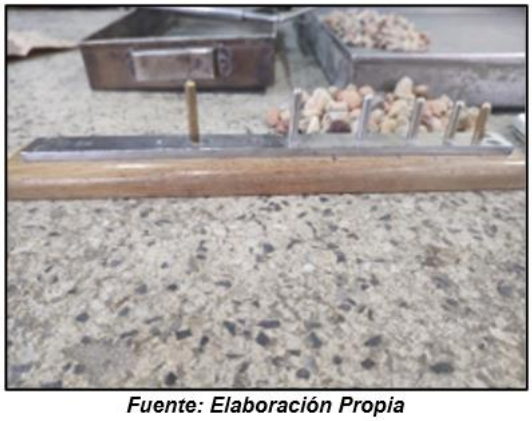
***Tabla 35.1 Masa mínima requerida para ensayo***

| Máximo Tamaño Nominal con aberturas cuadradas | | Masa mínima de la muestra de ensayo |
|---|---|---|
| mm | (Pulg) | kg |
| 9.5 | (3/8) | 1 |
| 12.5 | (½) | 2 |
| 19.0 | (3/4) | 5 |
| 25.0 | (1) | 10 |
| 37.5 | (1½) | 15 |
| 50.0 | (2) | 20 |
| 63.0 | (2½) | 35 |

***Fuente: Instituto Nacional de Vias – I.N.V. E-230-12***

Para estimar el índice de aplanamiento se tuvo en cuenta lo siguiente: "Una partícula plana es aquella cuya dimensión mínima (espesor) es menor a 0.6 de la dimensión media de la fracción". Utilizando el calibrador de ranuras se procede a tamizar el material retenido en cada una de las aperturas descritas anteriormente de manera manual, hasta finalizar completamente el proceso. Para cada una de las aperturas retenidas se registra el peso de las partículas planas.

Fotografía 21. ***Calibrador metálico de barras para longitudes***



***Fuente: Elaboración Propia***

Fotografía 20. ***Proceso de determinación de partículas largas***



***Fuente: Elaboración Propia***

Fotografía 22. ***Calibrador metálico de aberturas para determinar particulas planas***



***Fuente: Elaboración Propia***

Para el índice de alargamiento fue necesario utilizar el calibrador de barras en donde Según la norma para ensayos de materiales I.N.V.E-230-12 una partícula alargada es aquella cuya dimensión máxima es superior a 1.80 veces la dimensión media de la fracción. De manera similar se utiliza el material fraccionado en cada uno de los tamices para identificar la masa de partículas que no cumple el requerimiento de partícula alargada. Para ello de manera manual cada uno de los agregados se somete a una prueba de aceptación o rechazo la cual consiste en pasar la partícula a través de las barras del calibrador teniendo en cuenta la dimensión de la fracción retenida. La partícula que no logre pasar esta brecha se considerará como alargada.

## RESULTADOS OBTENIDOS

Con los datos obtenidos se procede a realizar los cálculos correspondientes a porcentajes de partículas planas y largas, así como índices de alargamiento y aplanamientos por fracción y globales.

% Partículas Largas o % de Alargamiento

$$\textbf{Pasa Tamiz} - \textbf{Retiene Tamiz} = \frac{\textbf{particulas largas (g)}}{\textbf{masa inicial tamiz (g)}} * \textbf{100} \qquad \textbf{(30)}$$

$$\textbf{PT 3/4"} - \textbf{RT 1/2"} = \frac{\textbf{particulas largas (g)}}{\textbf{masa inicial tamiz (g)}} * \textbf{100} = \left\lfloor \frac{\textbf{622,1}}{\textbf{1701,1}} \right\rfloor * \textbf{100} = \textbf{36,57\%}$$

$$\textbf{PT 1/2"} - \textbf{RT 3/8"} = \frac{\textbf{particulas largas (g)}}{\textbf{masa inicial tamiz (g)}} * \textbf{100} = \left\lfloor \frac{\textbf{783,6}}{\textbf{1811.7}} \right\rfloor * \textbf{100} = \textbf{43,25\%}$$

$$\textbf{PT 3/8"} - \textbf{RT 1/4"} = \frac{\textbf{particulas largas (g)}}{\textbf{masa inicial tamiz (g)}} * \textbf{100} = \left\lfloor \frac{\textbf{109,05}}{\textbf{2085}} \right\rfloor * \textbf{100} = \textbf{5,23\%}$$

## Índice de Alargamiento por Fracción y Global

$$\textbf{\textit{Indice de Aplanamiento por fracción}} = \frac{\textbf{\textit{retenido tamiz}} (\%) * \textbf{\textit{particulas largas}} (\%)}{100} \qquad \textbf{(31)}$$

$$\text{ILi RT } 1/2" = \frac{\text{retenido tamiz } (\%) * \textit{particulas largas } (\%)}{100} = \frac{30{,}39 * 36{,}37}{100} = 11{,}1\%$$

$$\text{ILi RT } 3/8" = \frac{\text{retenido tamiz } (\%) * \textit{particulas largas } (\%)}{100} = \frac{32{,}36 * 43{,}25}{100} = 14\%$$

$$\text{ILi RT } 1/4" = \frac{\text{retenido tamiz } (\%) * \textit{particulas largas } (\%)}{100} = \frac{37{,}25 * 5{,}23}{100} = 1{,}9\%$$

$$\textbf{INDICE DE ALARGAMIENTO GLOBAL} = \textbf{27\%}$$

% Partículas Planas o % de Aplanamiento

$$\boldsymbol{Pasa\ Tamiz - Retiene\ Tamiz\ = \frac{particulas\ planas\ (g)}{masa\ inicial\ tamiz\ (g)} * 100} \qquad \textbf{(32)}$$

$$\mathbf{PT\ 3/4" - RT\ 1/2" = \frac{particulas\ planas\ (g)}{masa\ inicial\ tamiz\ (g)} * 100 = \left\lfloor \frac{136,8}{1701,1} \right\rfloor * 100 = 8,04\%}$$

$$\mathbf{PT\ 1/2" - RT\ 3/8" = \frac{particulas\ planas\ (g)}{masa\ inicial\ tamiz\ (g)} * 100 = \left\lfloor \frac{59,2}{1811.7} \right\rfloor * 100 = 3,27\%}$$

$$\mathbf{PT\ 3/8" - RT\ 1/4" = \frac{particulas\ planas\ (g)}{masa\ inicial\ tamiz\ (g)} * 100 = \left\lfloor \frac{24,6}{2085} \right\rfloor * 100 = 1,18\%}$$

Índice de Aplanamiento por Fracción y Global

$$\boldsymbol{Indice\ de\ Aplanamiento\ por\ fracción\ = \frac{retenido\ tamiz\ (\%) * particulas\ planas\ (\%)}{100}} \qquad \textbf{(33)}$$

$$\text{ILi RT } 1/2" = \frac{\text{retenido tamiz (\%)} * particulas\ planas\ (\%)}{100} = \frac{30,39 * 8,04}{100} = 2,44\%$$

$$\text{ILi RT } 3/8" = \frac{\text{retenido tamiz (\%)} * particulas\ planas\ (\%)}{100} = \frac{32,36 * 3,27}{100} = 1,06\%$$

$$\text{ILi RT } 1/4" = \frac{\text{retenido tamiz (\%)} * particulas\ planas\ (\%)}{100} = \frac{37,25 * 1,18}{100} = 0,44\%$$

**INDICE DE APLANAMIENTO GLOBAL = 4%**

*Tabla 36. Resultados obtenidos luego del ensayo de indice de alargamiento y aplanamiento*

| INDICE DE ALARGAMIENTO Y APLANAMIENTO AGREGADO GRUESO | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| TAMIZ | TAMAÑO (mm) | MASA RETENIDA (g) | % RETENIDO | PARTICULAS LARGAS (g) | PARTICULAS LARGAS (%) | INDICE DE ALARGAMIENTO (%) | PARTICULAS PLANAS (g) | PARTICULAS PLANAS (%) | INDICE DE APLANAMIENTO (%) |
| 1 1/2" | 37 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1" | 25,4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3/4" | 19 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1/2" | 12,5 | 1701,1 | 30,39 | 622,10 | 36,57 | 11,11 | 136,80 | 8,04 | 2,44 |
| 3/8" | 9,5 | 1811,7 | 32,36 | 783,60 | 43,25 | 14,00 | 59,20 | 3,27 | 1,06 |
| 1/4" | 4,35 | 2085 | 37,25 | 109,05 | 5,23 | 1,95 | 24,60 | 1,18 | 0,44 |
| **TOTAL** | | **5597,8** | **100,00** | **1514,75** | | **27,06** | **220,60** | | **3,94** |

***Fuente: Elaboración Propia***

## INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

De acuerdo con los resultados obtenidos se tiene que el material granular como agregado para la elaboración de concreto estructural tiene un porcentaje tanto de aplanamiento como alargamiento aceptable, por lo que las partículas permitirán una compactación adecuada y responderá de manera aceptable cuando vaya a estar sometida a esfuerzos o cargas sin presentar deformación alguna.

# 10 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA

## 10.1 FLUORESCENCIA DE RAYOS X

El ensayo descrito a continuación fue realizado el día 26 de febrero del 2024 en el departamento de Geociencias, laboratorio de espectrometría de rayos x de la Universidad Nacional de Colombia.

El ensayo de fluorescencia de rayos X, permite establecer cuál es la composición química elemental de la ceniza de madera través del bombardeo de rayos X a dicho material donde los electrones que componen estos rayos están cargados de tanta energía que generan que los electrones de los niveles de valencia inferiores de los átomos sean expulsados, generando así un desbalance en la cargar eléctrica del átomo, la cual es compensada cuando los electrones de niveles superiores suplen estas posiciones de los electrones expulsados.

### MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS

Para la realización del ensayo de fluorescencia de rayos X se requirió la utilización de los siguientes materiales y equipos:

• Espectrómetro de fluorescencia de rayos x, MagixPro PW – 2440 Phillips con sensibilidad de 100 ppm (0.01%) en la detección de elementos pesados metálicos.

• +1000 g de ceniza de madera.

Fotografía 23. ***Ceniza de madera para ensayo de fluorescencia de X***




***Fuente: Tomado de informe de laboratorio – Fluorescencia de Rayos X***

Fotografía 24. ***Espectometro de fluorescencia de rayos X***



***Fuente: Tomado de Sistema de Información de la Investigación - HERMES (unal.edu.co)***

Como la muestra poseía un tamaño de partícula demasiada gruesa, esta se redujo con un molino de bolas de ágata, después se pasó por un tamiz de malla 100 micras.

La muestra en polvo fue secada a 105 °C por un periodo de 12 horas. Posteriormente mezclada con cera espectrométrica de la casa Merck en relación Muestra: Cera de 10:1; homogeneizada por agitación, llevada a una prensa hidráulica a 120 KN por un minuto generando una pastilla prensada de 37 mm de diámetro.

***Tabla 37.*** ***Resultados obtenidos caracterización por fluorescencia de rayos X***

| NOMBRE | ELEMENTO Y/O COMPUESTO | XRF - 8891 M-CENIZA DE MADERA MENDEZ |
|---|---|---|
| Calcio | CaO | 26,57% |
| Silicio | SiO2 | 18,36% |
| Potasio | K2O | 12,49% |
| Cloro | Cl | 10,60% |
| Sodio | Na2O | 6,82% |
| Titanio | TiO2 | 5,36% |
| Azufre | SO3 | 3,82% |
| Hierro | Fe2O3 | 3,79% |
| Aluminio | Al2O3 | 3,74% |
| Fósforo | P2O5 | 3,72% |
| Magnesio | MgO | 3,08% |
| Cromo | Cr | 0,37% |
| Arsénico | As | 0,28% |
| Bario | Ba | 0,21% |
| Cobre | Cu | 0,18% |
| Cerio | Ce | 0,13% |
| Zinc | Zn | 0,12% |
| Plomo | Pb | 0,12% |
| Manganeso | MnO | 0,10% |
| Estroncio | Sr | 0,09% |
| Zirconio | Zr | 0,05% |
| Rubidio | Rb | 0,01% |
| Itrio | Y | 47 ppm |

***Fuente: Elaboración Propia***

***Tabla 38.*** ***Comparativo composición química de los materiales cementantes empleados***

| *Compuesto* | *Cemento Portland, %* | *Ceniza volante, %* | *Escoria de alto horno, %* |
|---|---|---|---|
| $SiO_2$ | 18,15 | 54,30 | 33,70 |
| $Al_2O_3$ | 4,65 | 20,8 | 12,80 |
| $Fe_2O_3$ | 3,80 | 5,30 | 0,48 |
| CaO | 60,03 | 6,40 | 45,40 |
| MgO | 2,50 | 0,80 | 1,00 |
| $Na_2O$ | 0,80 | 0,90 | 0,12 |
| $K_2O$ | 0,50 | 0,70 | 1,50 |
| $P_2O_5$ | - | 0,70 | - |
| $TiO_2$ | - | 1,20 | 0,50 |
| MnO | - | 0,01 | - |
| $SO_3$ | 2,40 | 0,92 | - |
| $SiO_2/Al_2O_3$ | 3,90 | 2,61 | 2,63 |
| Inquemados | 0,6 | 8 | - |

***Fuente: Tomado de: CARDENAS, Jhon. LIZARAZO, Juan. APERADOR, William. Comportamiento mecánico de sistemas cementantes ternarios (Ceniza volante-Cemento Portland, Escoria de alto horno. Colombia. Universidad Militar Nueva Granada.***

**INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS**

El análisis semicuantitativo se realizó con el software SemiO 5, haciendo 11 barridos, con el fin de detectar todos los elementos presentes en la muestra, excluyendo H, C, Li, Be, B, N, O y los elementos transuránicos.

La presencia de Silicio y Calcio en la muestra de ceniza de madera evidencia la composición natural del material en el cual se presenta la reacción de los hidróxidos alcalinos con la pasta de cemento generando así un gel que absorbe el agua produciendo presiones internas en el concreto, además el Calcio actúa como regulador del proceso de fraguado.

La presencia de Potasio pudo ser perjudicial en la masa de concreto produciendo desprendimientos.

En cuanto al comparativo con otras materias primas que se utilizan en la sustitución o elaboración de concreto como lo son la ceniza volante y la escoria de alto horno se evidencia que la ceniza de madera contiene menor cantidad de Silicio que los demás, pero en cuanto al Calcio presenta mayor porcentaje que la ceniza volante y menor que la escoria de alto horno.

En conclusión, la composición química elemental indica que la calidad de la ceniza de madera es menor respecto a otros materiales utilizados pero que ya se debe profundizar el porcentaje utilizado para una sustitución en otras investigaciones y recalcar que estas sustituciones se realizaron en el cemento y no en el agregado fino por lo cual las interacciones que se generaron en la elaboración de concreto son muy diferentes.

## 10.2 CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA EN EL AGREGADO FINO

El ensayo descrito a continuación fue realizado el sábado 20 de mayo de 2023 en el Laboratorio de suelos y pavimentos de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de la facultad Tecnológica.

Este ensayo fue realizado teniendo en cuenta las especificaciones y requerimientos que emite la norma I.N.V.E 212 – 07. En él se puede identificar de manera visual por medio de una comparación de la muestra en una solución y una tabla de colores, la calidad de la arena y su posible presencia de impurezas que puedan afectar la resistencia del concreto que se va a elaborar con el agregado fino.

### MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS

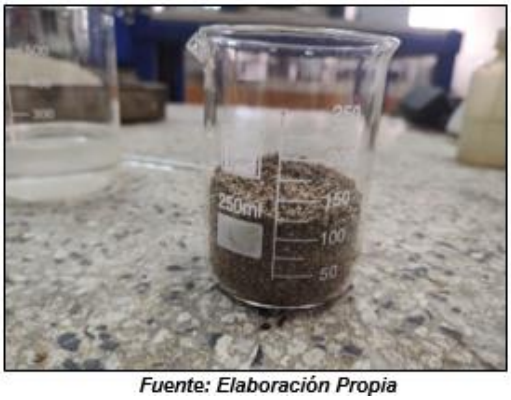
Para realizar el ensayo de contenido de materia orgánica al agregado fino fue necesaria la utilización de los siguientes materiales y equipos:

- Recipiente de vidrio incoloro (Beaker).
- Bagueta o varilla de agitación.
- 500 g de arena secada al aire.
- Embudo de plástico.
- Tamiz No. 4 con apertura de 4.75 mm.
- Solución de hidróxido de sodio (3%). Se disuelven 3 partes en masa de hidróxido de sodio (NaOH) en 97 partes de agua destilada.
- Paleta de colores para comparar la muestra de ensayo.

## PROCEDIMIENTO GENERAL DEL ENSAYO

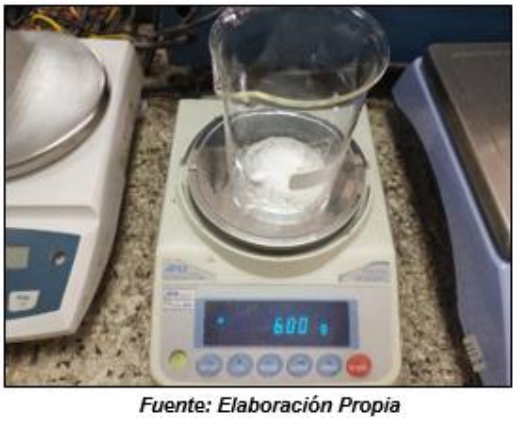
El ensayo de determinación de contenido de materia orgánica se desarrolló teniendo en cuenta la escala de colores que presenta la norma I.N.V.E-212-13 en la tabla 39. Para iniciar el ensayo se tomó el material compuesto en su totalidad por agregado fino secado al aire, el cual fue vertido en el recipiente (Beaker) utilizando un embudo, hasta llenar un volumen no menor a 130 ml. Luego se añade la solución previamente dosificada (6 g) de Hidróxido de Sodio (NaOH), garantizando que el conjunto (material y solución) tengan un volumen de 200 ml.

Fotografía 26. ***Agregado fino dispuesto para ensayo***



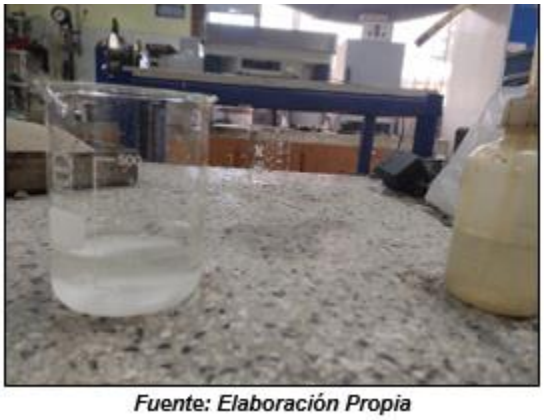

***Fuente: Elaboración Propia***

Fotografía 25. ***Masa de hidróxido de Sodio para solución***




***Fuente: Elaboración Propia***

Fotografía 27. ***Solución de hidróxido de Sodio***



***Fuente: Elaboración Propia***

Luego la solución es agitada vigorosamente por medio de la bagueta o varilla de agitación, pasado este periodo de tiempo el frasco se deja en estado de reposo por un periodo no menor a 24 horas. Luego se compara el color de la solución con los de la escala de colores, teniendo en cuenta que se considera que la muestra es limpia (no presenta impurezas) si el color de la solución se encuentra por debajo del número 3 (color estándar), mientras que la muestra está contaminada si el color de la solución es oscuro (colores 4 o 5).

***Tabla 39.*** ***Escala de vidrios de colores de referencia***

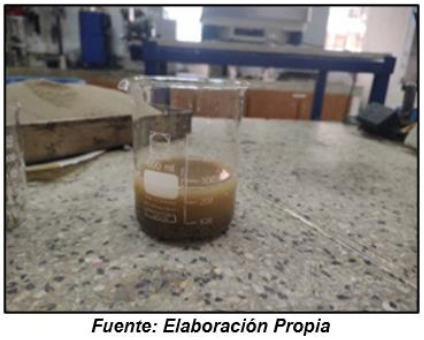
| Color Estándar Gardner No. | Placa Orgánica No. |
|---|---|
| 5 | 1 |
| 8 | 2 |
| 11 | 3 (estándar) |
| 14 | 4 |
| 16 | 5 |

***Fuente: Tomado de I.N.V.E-212-13 Contenido de materia orgánica en arenas usadas en la preparación de morteros o concretos.***

## RESULTADOS OBTENIDOS

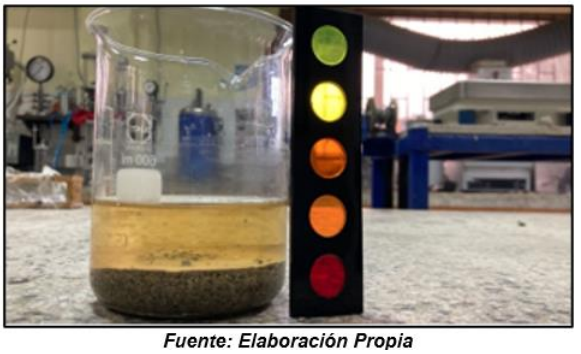
Luego de la realización del ensayo de contenido de materia orgánica se obtuvieron los siguientes resultados:

Fotografía 29. ***Solución + material dejado reposo***



***Fuente: Elaboración Propia***

Fotografía 28. ***Resultados obtenidos al comparar color obtenido en ensayo***



***Fuente: Elaboración Propia***

**INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS**

Teniendo en cuenta el color arrojado después del ensayo (color N° 8 según escala de Garnerd o N° 2 placa orgánica), se concluye que el color arrojado es más claro que el color de referencia por lo que indica que el agregado fino o arena es limpia sin la presencia de impurezas perjudiciales en el desarrollo de la resistencia del concreto elaborado con este material granular.

# 11 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA

## 11.1 DESGASTE EN MAQUINA DE LOS ÁNGELES

El ensayo descrito a continuación fue realizado el día 20 de mayo de 2023 en el Laboratorio de suelos y pavimentos de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de la facultad Tecnológica.

El propósito del presente ensayo es estimar la calidad de los agregados gruesos, sometiendo la muestra a un proceso de abrasión y desgaste, simulación realizada en la máquina de los ángeles, cuya normativa es la I.N.V.E-218-13.

### MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS

En el ensayo de resistencia al desgaste de máquina de los ángeles fue necesario utilizar los siguientes materiales y equipos:

- 5000 g de grava como agregado grueso con un tamaño máximo nominal de ¾”.
- Balanza con precisión de ± 0.01 g.
- Máquina de los ángeles según las especificaciones indicadas en la normatividad I.N.V.E-218-13.
- Juego de tamices: 1 1/2”, 1”, ¾”, ½”, 3/8”, ¼”, N° 4, N°8 y N° 12.
- 8 esferas metálicas con un peso de 400.0 ± 0.01 g.
- Recipientes de plástico.

### PROCEDIMIENTO GENERAL DEL ENSAYO

Para realizar el ensayo de resistencia a la abrasión y desgaste del agregado grueso se tamizó el material para obtener el tipo de gradación correspondiente según normatividad I.N.V.E-218-13.

Luego una vez lavada la muestra de ensayo, se seca el material en un horno a una temperatura de 110 ± 5 °C por un periodo de 24 horas.

***Tabla 40. Granulometrías ideales de acuerdo con el tipo de gradación***

| TAMAÑOS DE TAMIZ | | MASAS DE LAS DIFERENTES FRACCIONES, g | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| PASA TAMIZ | RETENIDO EN TAMIZ | GRANULOMETRÍAS | | | |
| | | A | B | C | D |
| 37.5 (1½")<br>25.0 (1")<br>19.0 (3/4")<br>12.5 (½")<br>9.5 (3/8")<br>6.3 (¼")<br>4.75 (No.4) | 25.0 (1")<br>19.0 (3/4")<br>12.5 (½")<br>9.5 (3/8")<br>6.3 (¼")<br>4.75 (No. 4)<br>2.36 (No. 8) | 1250 ± 25<br>1250 ± 25<br>1250 ± 10<br>1250 ± 10 | 2500 ± 10<br>2500 ± 10 | 2500 ± 10<br>2500 ± 10 | 5000 ± 10 |
| Total | | 5000 ± 10 | 5000 ± 10 | 5000 ± 10 | 5000 ± 10 |

***Fuente: Tomado de I.N.V.E-218-13 Resistencia a la degradación de los agregados menores a 37 mm por medio de máquina de los ángeles.***

De acuerdo con la granulometría realizada se determinó que la gradación correspondiente para realizar el ensayo es la de tipo C.

***Tabla 41. Determinación de la gradación ideal para ensayo de abrasión***

| TAMAÑOS DE TAMIZ (mm) | | MASAS DE LAS DIFERENTES FRACCIONES (g) TIPO DE GRADACIÓN | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| PASA TAMIZ | RETENIDO EN TAMIZ | A | B | C | D |
| 1 1/2"(37) | 1" (25,4) | 0 | | | |
| 1" (25,4) | 3/4" (19) | 8 | | | |
| 3/4" (19) | 1/2" (12,5) | 1981,8 | 1982 | | |
| 1/2" (12,5) | 3/8" (9,5) | 1342,5 | 1342,50 | | |
| 3/8" (9,5) | 1/4" (6,3) | | | 3204,50 | |
| 1/4" (6,3) | N° 4 (4,75) | | | 490,20 | |
| N° 4 (4,75) | N° 8 (2,36) | | | | 105,2 |
| TOTAL | | 3332,3 | 3324,3 | 3694,7 | 105,2 |

***Fuente: Elaboración Propia***

Se toma una masa que cumpla con las especificaciones de acuerdo al tipo de gradación obtenida la cual debe ser de 2500 ± 10 para los tamices ¼" y N° 4 respectivamente, esa es la masa inicial $P_1$.

Luego se procede a seleccionar la carga a utilizar es decir la cantidad de esferas a utilizar en la máquina a través de la siguiente tabla teniendo en cuenta que el tipo de gradación es la de tipo C según la granulometría realizada al material de ensayo.

***Tabla 42. Número de esferas a utilizar para ensayo de acuerdo a gradación***

| GRANULOMETRÍA | NÚMERO DE ESFERAS | MASA DE LA CARGA, g |
|---|---|---|
| A | 12 | 5000 ± 25 |
| B | 11 | 4584 ± 25 |
| C | 8 | 3330 ± 20 |
| D | 6 | 2500 ± 15 |

***Fuente: Tomado de I.N.V.E-218-13 Resistencia a la degradación de los agregados menores a 37 mm por medio de máquina de los ángeles.***

La carga de esferas a utilizar en el ensayo debe ser de 8, cada una con una masa de 390 a 445 g, mientras que la cantidad de material necesaria para realizar el ensayo no debe superar los 5000 ± 10 g.

Fotografía 30. ***Selección de partículas de acuerdo con gradación***



***Fuente: Elaboración Propia***

Fotografía 31. ***Masa correspondiente de acuerdo con gradación***



***Fuente: Elaboración Propia***

Revisando que el tambor y el material se encuentre limpio este es introducido en la máquina de los ángeles junto con las 8 esferas metálicas, sometiéndolo a un proceso de abrasión, desgaste y molienda durante un periodo de 500 vueltas a una velocidad de 30 a 33 rpm. Después el material

es lavado y secado al horno a una temperatura de 110 ± 5 °C por 24 horas, finalmente el residuo es tamizado sobre la apertura de 1.70 mm (N° 12), según normatividad I.N.V.E-218-13 y posteriormente pesado.

Fotografía 32. ***Tambor máquina de los ángeles***



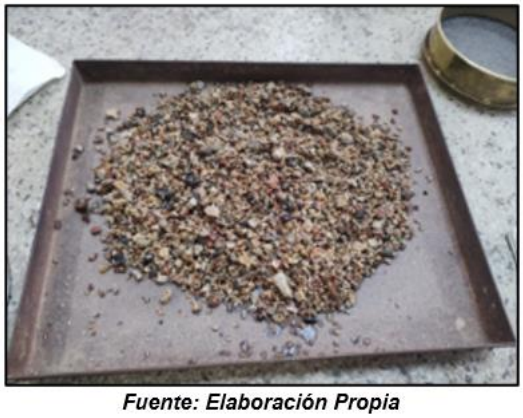
***Fuente: Elaboración Propia***

Fotografía 33. ***Material después de proceso de abrasión y desgaste***



***Fuente: Elaboración Propia***

Fotografía 34. ***Masa final después de proceso de abrasión y desgaste***



***Fuente: Elaboración Propia***

**RESULTADOS OBTENIDOS**

Para determinar el porcentaje de desgaste se debe realizar el siguiente cálculo de acuerdo a la normatividad I.N.V.E-218-13 a continuación:

$$\%\ \boldsymbol{de\ pérdidas} = \frac{\boldsymbol{P_{1-}\ P_2}}{\boldsymbol{P_1}} * \mathbf{100} \quad \textbf{(11.1)}$$

Donde:

$P_1$ = Masa inicial de la muestra seca antes del ensayo

$P_2$ = Masa final seca de la muestra después de tamizado sobre el tamiz N° 12

$$\%\ \boldsymbol{de\ pérdidas} = \frac{\mathbf{5010}\boldsymbol{g} - \mathbf{3056}\boldsymbol{g}}{\mathbf{5010}\boldsymbol{g}} * \mathbf{100} = \mathbf{39}\%$$

***Tabla 43.*** ***Tabla Resumen y resultados finales ensayo máquina de los ángeles***

| DATOS OBTENIDOS DURANTE EL ENSAYO | |
|---|---|
| Número de esferas según tipo de gradación | 8 |
| Número de vueltas | 500 |
| Masa inicial P1 antes del ensayo (g) | 5010 |
| Masa final P2 después del ensayo (g) | 3056 |
| Masa de pérdida del material (g) | 1954 |
| % de desgaste del material | 39 |

*Fuente: Elaboración Propia*

## INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

De acuerdo con los datos obtenidos se puede evidenciar que el material que se utilizará para la elaboración de concreto estructural posee una resistencia a la abrasión, desgaste y molienda del 39%, cumpliendo con especificaciones requeridas en el desarrollo de la resistencia para este tipo de utilización ya que el porcentaje de perdida de los agregados pétreos se encuentra entre el 30 y 45%.

## 11.2 ENSAYO MICRO DEVAL

El ensayo descrito a continuación fue realizado el día 30 de mayo de 2023 en el Laboratorio de suelos y pavimentos de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de la facultad Tecnológica.

El propósito del presente ensayo es estimar la calidad de los agregados gruesos, sometiendo la muestra a un proceso de abrasión y desgaste en condición húmeda del material por un periodo determinado según la gradación de la muestra con la máquina Micro Deval y cuya normativa es la I.N.V.E-238-13.

### MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS

En el ensayo de resistencia a la abrasión y desgaste utilizando la máquina de micro Deval fue necesario utilizar los siguientes materiales y equipos:

- 4500 g de grava como agregado grueso con un tamaño máximo de ¾”’.
- Balanza con precisión de ± 0.01 g.
- Máquina micro deval según las especificaciones de la normatividad I.N.V.E-238-13.
- Juego de tamices de 19.0 mm (3/4”), 16.0 mm (5/8”), 12.5 mm (1/2”), 9.5 mm (3/8”), 6.3 mm (1/4”), 4.75 mm (N° 4), 1.18 mm (N° 16).
- Esferas metálicas con un peso total aproximado de 5000 g.
- 2 L de agua.
- Horno con capacidad de alcanzar y mantener una temperatura de 110 ± 5 °C.

## PROCEDIMIENTO GENERAL DEL ENSAYO

Para el presente ensayo se decidió utilizar 4500 g de material granular para realizar la prueba de los 3 tipos de gradaciones. Una vez el material es lavado y secado al horno a una temperatura de 110 ± 5 °C es tamizado teniendo en cuenta las masas retenidas en los tamices descritos en las tablas de preparación para muestra seca al horno, cada una de las tres muestras contó con un peso no menor de 1500.0 ± 0.01 g.

***Tabla 44.*** ***Preparación de la muestra seca al horno de 19 mm***

| GRADACIÓN A | | |
|---|---|---|
| PASA TAMIZ | RETENIDO EN TAMIZ | MASA (g) |
| 3/4" (19) | 5/8" (16) | 375 |
| 5/8" (16) | 1/2" (12,5) | 375 |
| 1/2" (12,5) | 3/8" (9,5) | 750 |

***Fuente: Tomado de I.N.V.E-238-13 Determinación de la resistencia del agregado grueso al desgaste por abrasión utilizando el aparato Micro Deval.***

***Tabla 45.*** ***Preparación de la muestra seca al horno tamaño menor a 16 mm***

| GRADACIÓN B | | |
|---|---|---|
| PASA TAMIZ | RETENIDO EN TAMIZ | MASA (g) |
| 1/2" (12,5) | 3/8" (9,5) | 750 |
| 3/8" (9,5) | 1/4" (6,3) | 375 |
| 1/4" (6,3) | N° 4 (4,75) | 375 |

***Fuente: Tomado de I.N.V.E-238-13 Determinación de la resistencia del agregado grueso al desgaste por abrasión utilizando el aparato Micro Deval.***

***Tabla 46.*** ***Preparación de la muestra seca al horno tamaño menor a 12.5 mm***

| GRADACIÓN C | | |
|---|---|---|
| PASA TAMIZ | RETENIDO EN TAMIZ | MASA (g) |
| 3/8" (9,5) | 1/4" (6,3) | 750 |
| 1/4" (6,3) | N° 4 (4,75) | 750 |

***Fuente: Tomado de I.N.V.E-238-13 Determinación de la resistencia del agregado grueso al desgaste por abrasión utilizando el aparato Micro Deval.***

Luego establecer las respectivas masas de acuerdo con la normatividad para cada tipo de gradación del material retenido en los tamices, se procede a colocar en remojo cada una de las muestras dentro de un recipiente con dos litros de agua de llave por un periodo no menor a 1 hora a temperatura ambiente. Pasado este tiempo cada muestra es colocada de manera individual dentro de máquina micro deval, junto con las esferas (5000g), y el agua, posterior a ello se verifica la hermeticidad de la máquina para luego encenderla y así iniciar el proceso de abrasión en estado húmedo para cada una de las muestras; el tiempo estimado para cada ensayo varía de acuerdo al tipo de gradación como lo indica la norma técnica I.N.V.E-238-13.

Fotografía 35. ***Material en inmersión de acuerdo a cada aradación***



**Fuente: Elaboración Propia**

A continuación, se muestra el tiempo de duración del ensayo para los diferentes tamaños máximos de agregados utilizados.

***Tabla 47. Tiempo indicado según la gradación indicada***

| TIPO DE GRADACIÓN | TIEMPO DE ROTACIÓN (min) | NÚMERO DE REVOLUCIONES |
|---|---|---|
| A | 120 ± 1 | 12000 ± 100 |
| B | 105 ± 1 | 10500 ± 100 |
| C | 95 ± 1 | 9500 ± 100 |

***Fuente: Tomado de I.N.V.E-238-13 Determinación de la resistencia del agregado grueso al desgaste por abrasión utilizando el aparato Micro Deval.***

Fotografía 36. ***Preparación del equipo para ensayo***



*Fuente: Elaboración Propia*

Fotografía 37. ***Material granular para ensayo de desgaste y abrasión***



*Fuente: Elaboración Propia*

Fotografía 38. ***Aparato Micro Deval para ensayo de abrasión y desgaste***



*Fuente: Elaboración Propia*

Luego de someter las muestras a los procesos de molienda durante los tiempos anteriormente descritos, se procede a remover cada una de las muestras de la máquina de Micro Deval, teniendo en cuidado de no perder material durante el proceso, luego este es lavado sobre el tamiz de 1.18 mm hasta eliminar la totalidad de las partículas de menor tamaño; por último el material retenido en el tamiz de 1.18 mm y 4.75 mm es secado al horno a una temperatura de 110 ± 5 °C, este es pesado para luego ser sometido a los cálculos correspondientes para determinar el degaste del material utilizado en el ensayo.

Fotografía 39. ***Material lavado después del proceso de desgaste***



*Fuente: Elaboración Propia*

## RESULTADOS OBTENIDOS

Para la determinación de los porcentajes de desgaste del agregado grueso se tomó como referencia los cálculos emitidos por la normatividad I.N.V.E-238-13.

$$\%\ \boldsymbol{de\ pérdidas} = \frac{\boldsymbol{m_{1-}\ m_2}}{\boldsymbol{m_1}} * \boldsymbol{100} \quad \textbf{(11.2)}$$

### Gradación tipo A

$$\%\ \boldsymbol{de\ pérdidas} = \frac{\boldsymbol{1459,8 - 934,6}}{\boldsymbol{1459,8}} * \boldsymbol{100 = 36\%}$$

### Gradación tipo B

$$\%\ \boldsymbol{de\ pérdidas} = \frac{\boldsymbol{1500,2 - 895}}{\boldsymbol{1500,2}} * \boldsymbol{100 = 40\%}$$

### Gradación tipo C

$$\%\ \boldsymbol{de\ pérdidas} = \frac{\boldsymbol{1495,5 - 825}}{\boldsymbol{1495,5}} * \boldsymbol{100 = 44\%}$$

Al realizar el ensayo de resistencia al desgaste por micro deval se obtuvieron los siguientes resultados para las tres muestras trabajadas dependiendo de su tipo de gradación:

*Tabla 48.* ***Resultados obtenidos ensayo Micro Deval***

| DATOS OBTENIDOS DURANTE EL ENSAYO | | | |
|---|---|---|---|
| Tipo de Gradación | A | B | C |
| Número de revoluciones | 12000 | 10500 | 9500 |
| Masa inicial m1 antes del ensayo (g) | 1459,8 | 1500,2 | 1496 |
| Masa final m2 después del ensayo (g) | 934,6 | 895 | 825 |
| Masa de pérdida del material (g) | 525,2 | 605,2 | 670,5 |
| % de desgaste del material | 36 | 40 | 44 |

*Fuente: Elaboración Propia*

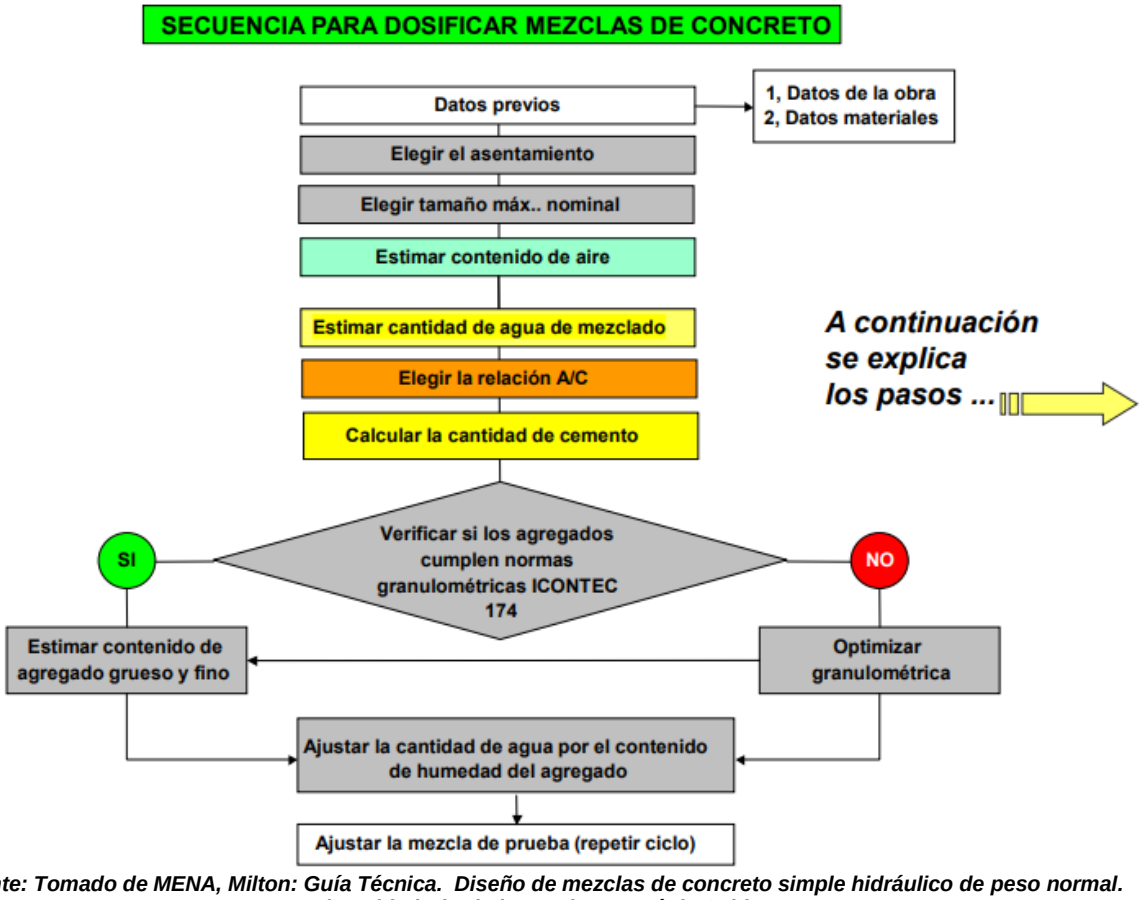
## INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos a través del ensayo de resistencia al desgaste por abrasión con la máquina Micro Deval, el material granular utilizado como agregado grueso en la elaboración de concreto estructural presenta un porcentaje al desgaste superior al 20%, el cual deja como conclusión que al momento de estar completamente saturado el material es vulnerable y disminuirá notablemente su resistencia además de mencionar que incluso después de secado al horno ya presentaba una disminución de masa para dos de las muestras utilizadas para el ensayo. Con esto se confirma que para ensayos de desgaste en inmersión a menor tamaño de sus partículas menor será la resistencia que el material presente.

# 12 DISEÑO DE MEZCLA

Para diseñar la mezcla de concreto estructural, se tuvo en cuenta la bibliografía anteriormente vista en el libro "Tecnología de concreto y del mortero" del ingeniero Diego Sáenz y la guía técnica: "Diseño de mezclas de concreto simple hidráulico de peso normal" del ingeniero Milton Mena, tutor designado para este trabajo de grado tecnológico.

Para lo cual se tomó un esquema que representa el debido procedimiento para realizar un diseño de mezcla teniendo en cuenta los requerimientos establecidos por la normatividad colombiana e internacional.




***Fuente: Tomado de MENA, Milton: Guía Técnica. Diseño de mezclas de concreto simple hidráulico de peso normal. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.***

## I. Datos generales de la obra

Se estableció elaborar un concreto para construir columnas (25x25) cm de una edificación, dicha construcción no estuvo expuesta a condiciones agresivas ambientales. Por tanto, no se considera grado alguno de exposición.

Se deseaba una trabajabilidad de media a alta, puesto que la estructura es medianamente reforzada.

El diseño estructural exige una resistencia a la compresión a los 28 días sea de 3000 PSI – 210 kg/cm² – 21MPa.

***Tabla 49. Datos generales del material para diseñar el elemento estructural***

| DATOS DEL MATERIAL Y DE LA OBRA | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **CARACTERISTICAS DEL MATERIAL** | **GRAVA** | **ARENA** | **OTROS** | **UNIDADES** | **IMPORTANCIA** |
| **Curva Granulométrica** | Si hay | Si hay | No aplica | No aplica | Verificar existencia |
| **Tamaño máximo del agregado** | 19 | No aplica | No aplica | mm | Para retirarlo de la obra |
| **Tamaño máximo nominal** | 19 | No aplica | No aplica | mm | Para diseño de mezcla |
| **Masa unitaria compacta (MUC)** | 1281,34 | 1468,3 | No aplica | Kg/m3 | Para dosificar mezcla |
| **Masa unitaria suelta (MUS)** | 1252,56 | 1415,03 | No aplica | Kg/m3 | Para compra del material |
| **Densidad aparente** | 2.154 | 2.474 | No aplica | Kg/m3 | Para diseño de mezcla |
| **Absorción agregado** | 8,1 | 2,94 | No aplica | % | Para corregir humedad |
| **Humedad natural** | 4,64 | 4,59 | No aplica | % | Para corregir humedad |
| **Origen del material** | Aluvial | Aluvial | No aplica | No aplica | Para uso de gráficas |
| **Forma** | Angular | Redondeada | No aplica | No aplica | Para uso de gráficas |
| **Textura** | Rugosa | Lisa | No aplica | No aplica | Para uso de gráficas |
| **Agua** | Acueducto de la localidad (Bogotá) | | | | |
| **Cemento** | Tipo I, densidad de 3100 kg/m3 | | | | |
| **Aditivos** | Para este diseño no usamos aditivos (NOTA: el aditivo se dosifica en función del peso del cemento máx. 5% orden de magnitud entre 15 y 25 kilos por m3 de concreto). | | | | |
| | | | | | |
| **Datos de la obra a realizar** | | | | | |
| **Elemento estructural a construir** | Construcción de columna de una edificación | | | | |
| **Cantidad de refuerzo** | Medianamente reforzada | | | | |
| **Condiciones extras** | Ninguna (Elemento no expuesto a la intemperie) | | | | |
| **Grados de exposición** | Según la NSR - 10 titulo C.4, hay 4 grados de exposición (F,S,P.C) | | | | |
| **Tipo de clima** | Suave | | Moderado | | Severo |
| **Normativas que aplican** | NTC 174, NSR - 10, ACI 211 | | | | |
| **Asentamiento recomendado** | Para la construcción de columnas | | | | |

***Fuente: Elaboración Propia***

## 12.1 Selección del asentamiento

Según el tipo de estructura (columna) se tiene que se puede elegir un asentamiento entre 5 y 10 cm. (Se hace en función del grado de trabajabilidad deseado, en este caso para el desarrollo del concreto estructural con adición de ceniza como sustituto parcial del agregado fino se determinó un grado de trabajabilidad medio – alto).

**Asentamiento = 6 cm**

***Tabla 50. Asentamiento recomendado según especificaciones***

| 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 (lanzados) | 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 operadoas manualmente | Secciones simplemente reforzadas, con vibración |
| Media | 50-100 | Pavimentos compactados a mano, lozas 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) |

***Fuente: Tomado de SÁNCHEZ, Diego: Practical Method for Design Mixes of Normal Weight Concrete – Based on A.C.I 211.1***

## 12.2 Elección del tamaño máximo nominal (TMN)

De acuerdo a la granulometría realizada anteriormente en los ensayos iniciales al agregado y teniendo en cuenta el elemento estructural para el cual es el diseño de mezcla con sus dimensiones correspondientes (columna 25x25 cm). Confirmando dicha información en la tabla

***Tabla 51. Tamaños máximos de agregados según tipo de construcción***

| Tamaño máximos de agregados según el tipo de construcción | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Dimensión mínima de la seccion (cm) | Tamaño máximo en pulg (mm) | | | |
| | Muros reforzados vigas y columnas | Muros sin refuerzo | Losas muy reforzadas | Losas sin refuerzo o poco reforzadas |
| 6 - 15 | 1/2 (12) - 3/4 (19) | 3/4 (19) | 3/4 (19) - 1 (25) | 3/4 (19) - 1 1/2 (38) |
| 19 - 29 | 3/4 (19) - 1 1/2 | 1 1/2 (38) | 1 1/2 (38) | 1 1/2 (38) - 3 (76) |
| 30 - 74 | 1 1/2 (38) - 3 (76) | 3 (76) | 1 1/2 (38) - 3 (76) | 3 (76) |
| 75 o más | 1 1/2 (38) - 3 (76) | 6 (152) | 1 1/2 (38) - 3 (76) | 3 (76) - 6 (152) |

*Fuente: Tomado de SÁNCHEZ, Diego: Practical Method for Design Mixes of Normal Weight Concrete – Based on A.C.I 211*

**De acuerdo a los parámetros anteriores se establece un TMN de ¾" o 19 mm.**

## 12.3 Estimación del contenido de aire

Según el tipo de estructura y las condiciones iniciales del diseño donde no se considera que esta columna está expuesta a condiciones ambientales agresivas y puesto que la trabajabilidad es buena, es decir no requiere incorporadores de aire.

Por tanto, se considera que el contenido de aire atrapado en el concreto es de 2.0%

Según la tabla siguiente se toma el contenido de aire en función del TMN:

***Tabla 52. Contenido de aire de acuerdo al tamaño máximo nominal***

| Tamaño máximo nominal del agregado | | Contenido de aire en porcentaje (por volumen) | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| mm | pulg. | Naturalmente atrapado | Exposición ligera | Exposición moderada | Exposición severa |
| 9.51 | ⅜ | 3.0 | 4.5 | 6.0 | 7.5 |
| 12.7 | ½ | 2.5 | 4.0 | 5.5 | 7.0 |
| 19.0 | ¾ | 2.0 | 3.5 | 5.0 | 6.0 |
| 25.4 | 1 | 1.5 | 3.0 | 4.5 | 6.0 |
| 38.1 | 1½ | 1.0 | 2.5 | 4.5 | 5.5 |
| 50.8 | 2 | 0.5 | 2.0 | 4.0 | 5.0 |
| 76.1 | 3 | 0.3 | 1.5 | 3.5 | 4.5 |
| 152.0 | 6 | 0.2 | 1.0 | 3.0 | 4.0 |

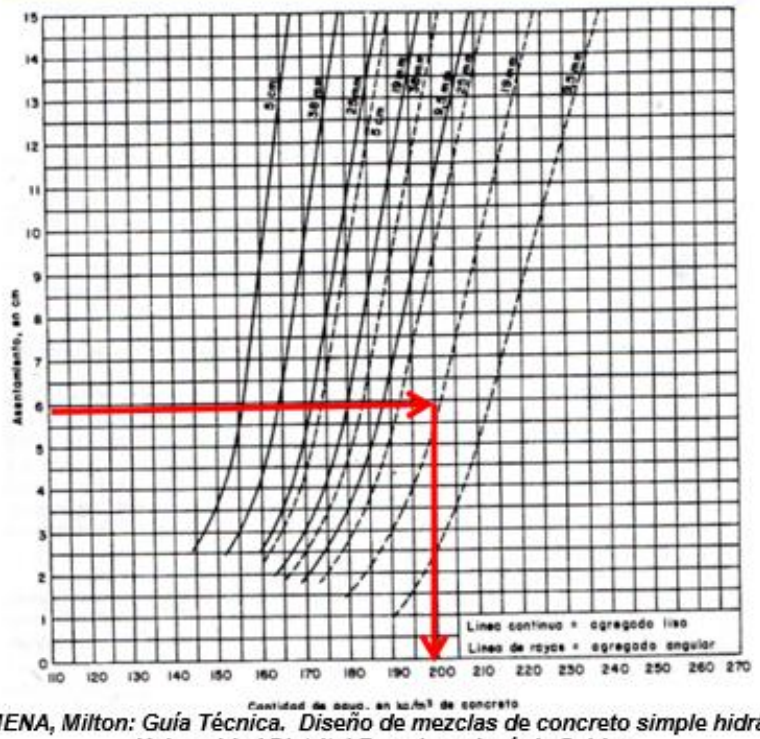
*Fuente: Tomado de A.C.I. Committee 211: Recommended Practice for Selecting Proportions for Normal Weight Concrete (A.C.I 211.1 – 70). American Concrete Institute, Detroit. Mich., 1983.*

Se establece que el contenido de aire atrapado es de 0,02 m³ de aire por m³ de concreto

## 12.4 Estimación de la cantidad de agua

Según las condiciones del diseño para TMN de 19 mm, asentamiento de 6 cm de la siguiente gráfica se obtiene:

***Gráfico 9. Estimación del contenido de agua según asentamiento***




*Fuente: Tomado de MENA, Milton: Guía Técnica. Diseño de mezclas de concreto simple hidráulico de peso normal. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.*

También se puede establecer la cantidad de agua para el diseño de la mezcla de concreto con la tabla que relaciona el asentimientos y tamaños máximos de los agregados de la siguiente manera:

***Tabla 53. Requerimiento aproximado de agua de mezclado par diferentes asentamientos y tamaños máximos de agregado, con partículas de forma angular y textura rugosa, en concreto sin aire incluido***

| 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 |

*Fuente: Tomado de CORREA, Diego F.; PEREZ, Carlos D.: Requerimiento de agua de mezclado para concretos de peso normal, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, 1990.*

De ambas fuentes se establece que el contenido de agua es de 200 kg/m³ y para el volumen de agua total en el concreto hay que dividir el contenido de agua por la densidad del agua:

**Es decir: 200 kg/1000 kg/m³ = 0.2 m³ de agua / por m³ de concreto**

## 12.5 Estimación de la relación a/c

Según las condiciones iniciales del diseño y teniendo en cuenta que no se tienen registros de ensayos de resistencia en obra (menor a 30 datos), los cuales no permiten establecer una desviación estándar. Debe determinarse de la tabla C.5.3.2 de la NSR – 10. La cual permite establecer la resistencia requerida para este tipo de diseño de mezcla, el cual debe tener mayor desarrollo u oposición a la carga aplicada a la que se tiene inicialmente en su resistencia de 21 Mpa.

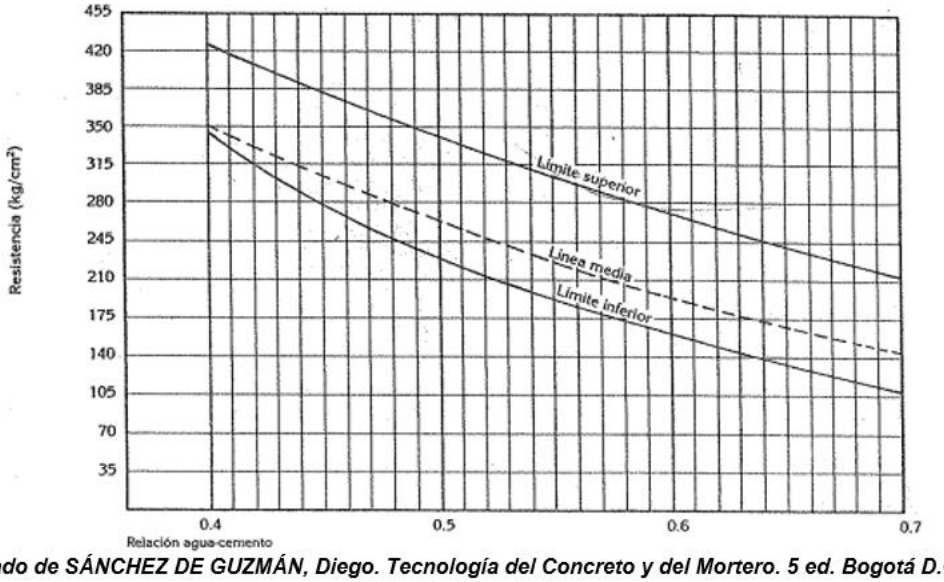
*Tabla 54.* ***Resistencia promedio a la compresión requerida cuando no hay datos disponibles para establecer una desviación estándar de la muestra***

| Resistencia especificada a la compresión, MPa | Resistencia promedio requerida a la compresión, MPa |
|---|---|
| $f'_c < 21$ | $f'_{cr} = f'_c + 7.0$ |
| $21 \le f'_c \le 35$ | $f'_{cr} = f'_c + 8.3$ |
| $f'_c > 35$ | $f'_{cr} = 1.10f'_c + 5.0$ |

*Fuente. Tomado de Norma Sismo Resistente. NSR-10 Titulo C.5.3.2.2.*

Por lo cual la resistencia requerida de acuerdo con la normatividad es de 29.3 MPa y la relación a/c ahora se determinará en base a este nuevo valor en la curva de resistencia vs relación a/c.

*Gráfico 10.* ***Correspondencia entre la resistencia a la compresión a los 28 días de edad y la relación agua-cemento para los cementos colombianos, portland tipo I, en concretos con y sin aire incluido.***




*Fuente: Tomado de SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. Tecnología del Concreto y del Mortero. 5 ed. Bogotá D.C. Bhandar editores LTDA. 2001*

*Tabla 55.* ***Correspondencia entre la resistencia a la compresión a los 28 días de edad y la relación agua-cemento para los cementos colombianos, Portland tipo I, en concretos sin aire incluido.***

| 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 |

*Fuente: Tomado de SÁNCHEZ, Diego: Tecnología del concreto y del mortero. Pontificia Universidad Javeriana.*

Otra manera de confirmar el valor de la relación a/c determinado en el gráfico 10 es por medio de la tabla 55 producto de la investigación realizada por la universidad Pontificia Javeriana realizada en el año 1991 y que se expone en el libro tecnología del concreto y mortero de Diego Sánchez. Finalmente se determinó el valor de la relación por medio de una interpolación para la resistencia requerida de 29.3 MPa la cual es de 0.47.

***Relación A/C y su incidencia en la Resistencia-Manejabilidad-Durabilidad***




*Fuente: Tomado de MENA, Milton: Guía Técnica. Diseño de mezclas de concreto simple hidráulico de peso normal. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.*

Si deseamos reducir el contenido de a/c, podemos mejorar la resistencia, recordemos que la relación agua – cemento está asociada a la resistencia, durabilidad y manejabilidad. Por tanto, hay dos variables que se mejoran y una que se reduce si se disminuye la relación agua – cemento.

## 12.6 Estimación del contenido de cemento

Según la formula;

$$\boldsymbol{C = \frac{a}{a/c}} \quad \textbf{(12.1)}$$

Donde:

**C** = Cantidad de cemento en kg.

**a** = Cantidad de agua en kg

**a/c** = Relación agua-cemento

$$\mathbf{C = \frac{200}{0.47} = 426\ kg\ de\ cemento}$$

Para el volumen de cemento total en el concreto, se divide el contenido de cemento por la densidad del cemento.

$$\boldsymbol{Vc = \frac{a}{d} = \frac{426\ kg}{3100\ kg/m^3} = 0.13\ m^3\ de\ cemento\ por\ m^3\ de\ concreto} \quad \textbf{(12.2)}$$

Donde:

**Vc** = Volumen de cemento por m³ de concreto.

a = Cantidad de agua en kg.

d = Densidad del cemento en kg/m³.

## 12.7 Verificación de la granulometría de acuerdo con los parámetros establecidos por la NTC 174.

*Tabla 56. Verificación franja granulométrica agregado grueso de acuerdo a normativa*

| ANALISIS GRANULOMETRICO AGREGADO GRUESO | | | | | CUMPLE NTC 174 |
|---|---|---|---|---|---|
| TAMIZ | TAMAÑO (mm) | % PASA | LIMITE INF | LIMITE SUP | |
| 1 1/2" | 37 | 100,00 | 100 | 100 | SI |
| 1" | 25,4 | 100,00 | 100 | 100 | SI |
| 3/4" | 19 | 100,00 | 90 | 100 | SI |
| 1/2" | 12,5 | 80,06 | 0 | 0 | NO APLICA |
| 3/8" | 9,5 | 45,01 | 20 | 55 | SI |
| N° 4 | 4,75 | 1,05 | 0 | 10 | SI |
| N° 8 | 2,36 | 0,38 | 0 | 5 | SI |
| N° 16 | 1,18 | 0,31 | 0 | 5 | SI |
| N° 30 | 0,6 | 0,29 | 0 | 5 | SI |
| FONDO | | 0,00 | | | |
| TOTAL | | | | | |

*Fuente: Elaboración Propia*

De acuerdo con la granulometría realizada en el agregado grueso, se puede observar que la franja del porcentaje pasa cumple con los límites establecidos en la NTC 174.

*Tabla 57. Verificación franja granulométrica agregado fino de acuerdo a normativa*

| ANALISIS GRANULOMETRICO AGREGADO FINO | | | | | CUMPLE NTC 174 |
|---|---|---|---|---|---|
| TAMIZ | TAMAÑO (mm) | % PASA | LIMITE INF | LIMITE SUP | |
| 3/8" | 9,5 | 99,75 | 100 | 100 | NO |
| N° 4 | 4,75 | 94,12 | 95 | 100 | NO |
| N° 8 | 2,36 | 89,70 | 80 | 100 | SI |
| N° 16 | 1,18 | 84,03 | 50 | 85 | NO APLICA |
| N° 30 | 0,6 | 16,38 | 25 | 60 | NO |
| N° 50 | 0,3 | 4,92 | 10 | 30 | NO |
| N°100 | 0,15 | 0,37 | 2 | 10 | NO |
| N° 200 | 0,075 | 0,02 | 0 | 5 | SI |
| FONDO | | 0,00 | | | |
| TOTAL | | 3,10 | | | |

*Fuente: Elaboración Propia*

Por otro lado, la granulometría realizada en el agregado fino demuestra que el porcentaje pasa no cumple con los parámetros establecidos en la NTC 174, por lo cual es necesario una optimización.

## 12.8 Optimización de la muestra de agregados para conocer el porcentaje adecuado para el diseño de mezcla.

En este caso se utilizó el método por mínimos cuadrados apoyándonos en la granulometría ideal de porcentaje pasa de Fuller – Thompson.

La metodología de optimización granulométrica desarrollada por Fuller – Thomson en 1907 presentada en el trabajo "The laws of proportioning concrete", es considerada como la base de la gran mayoría de los principios de optimización. La ecuación que describe la granulometría ideal de Fuller – Thomson con forma de parábola es la siguiente:

$$\boldsymbol{P = \sqrt{\frac{d}{D}}} \quad \textbf{(12.3)}$$

Donde:

$\boldsymbol{P}$ = porcentaje de material que pasa por el tamiz de abertura $d$.

$\boldsymbol{D}$ = Tamaño máximo del agregado.

La tabla que contiene los porcentajes ideales de material que pasa determinada apertura de tamiz en función del tamaño máximo del agregado es la siguiente, allí se toma la lectura de la columna correspondiente al TMN de ¾" ya que es la apertura por la que se estableció en el análisis granulométrico para el diseño de mezcla.

*Tabla 58.* ***Gradaciones ideales Fuller-Thompson de agregados para concreto en porcentaje pasa***

| TAMIZ | | TAMAÑO MAXIMO mm (pulg.) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| mm | pulg. | 76.1 (3") | 50.8 (2") | 38.1 (1½") | 25.4 (1") | 19.0 (¾") | 12.7 (½") | 9.51 (⅜") |
| 76.1 | 3" | 100.0 | | | | | | |
| 50.8 | 2" | 81.6 | 100.0 | | | | | |
| 38.1 | 1½" | 70.7 | 86.6 | 100.0 | | | | |
| 25.4 | 1" | 57.8 | 70.7 | 81.6 | 100.0 | | | |
| 19.0 | ¾" | 50.0 | 61.2 | 70.7 | 86.6 | 100.0 | | |
| 12.7 | ½" | 40.9 | 50.0 | 57.8 | 70.7 | 81.6 | 100.0 | |
| 9.51 | ⅜ | 35.4 | 43.3 | 50.0 | 61.2 | 70.7 | 87.2 | 100.0 |
| 4.76 | No. 4 | 25.0 | 30.6 | 35.0 | 43.3 | 50.0 | 61.2 | 70.8 |
| 2.38 | No. 8 | 17.7 | 21.6 | 25.4 | 30.6 | 35.4 | 43.3 | 50.0 |
| 1.19 | No. 16 | 12.5 | 15.3 | 17.7 | 21.6 | 25.0 | 30.6 | 35.4 |
| 0.595 | No. 30 | 8.8 | 10.8 | 12.5 | 15.3 | 17.7 | 21.6 | 25.0 |
| 0.297 | No. 50 | 6.2 | 7.7 | 8.8 | 10.8 | 12.5 | 15.3 | 17.8 |
| 0.149 | No. 100 | 4.4 | 5.4 | 6.2 | 7.7 | 8.8 | 10.8 | 12.6 |

*Fuente: Tomado de SÁNCHEZ de GUZMÁN, Diego. Tecnología del Concreto y del Mortero. 5 ed. Bogotá D.C. Bhandar editores LTDA. 2001.*

.

Una vez se tiene claro los porcentajes ideales para el TMN, se procede a realizar el cálculo de la proporción ideal de agregados para la mezcla de concreto. Para ello se toman los % pasa reales de cada uno de los materiales hallados a través del análisis granulométrico como se muestra en la siguiente tabla:

*Tabla 59.* ***Porcentajes reales vs porcentajes Ideales según Fuller-Thompson***

| TAMIZ | TAMAÑO (mm) | Arena | Grava | Fuller-Thompson |
|---|---|---|---|---|
| | | x1=%Pasa | x2=%Pasa | cj=100Vdj/D=19 |
| 3/4" | 19 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 1/2" | 12,7 | 100,00 | 80,06 | 81,76 |
| 3/8" | 9,51 | 99,75 | 45,01 | 70,75 |
| N° 4 | 4,76 | 94,12 | 1,05 | 50,05 |
| N° 8 | 2,38 | 89,70 | 0,38 | 35,39 |
| N° 16 | 1,19 | 84,03 | 0,31 | 25,03 |
| N° 30 | 0,595 | 16,38 | 0,29 | 17,70 |
| N° 50 | 0,297 | 4,92 | 0,00 | 12,50 |
| N°100 | 0,149 | 0,37 | 0,00 | 8,86 |

*Fuente: Elaboración Propia*

Siendo x1= % ideal del agregado fino y x2= % ideal del agregado grueso requerido para el diseño de mezcla tenemos:

$$\sum_{j=1}^{n} x_j = x_1 + x_2 = 1 \quad \textbf{(34)}$$

Al conocer la granulometría ideal Fuller – Thomson se debe buscar la ecuación lineal más cercana a partir de la información real obtenida en el análisis granulométrico de los agregados, para ello se plantean las siguientes ecuaciones lineales:

$$a_{ij}x_i + a_{ij}x_j - c_i = r_i \quad \textbf{(35)}$$

Donde:

$\boldsymbol{aij}$ = Porcentaje de árido en volumen del grupo granulométrico (j), que pasa un determinado tamiz (i), en un análisis granulométrico realizado previamente.

$\boldsymbol{ci}$ = Porcentaje ideal de árido en volumen que pasa por el tamiz de apertura d.

$\boldsymbol{rj}$ = Función residuo que se desea minimizar, de tal manera que:

$$\sum_{i=1}^{m} r_i^2 \; sea\ mínimo \quad \textbf{(36)}$$

$\boldsymbol{n}$ = Clases de agregados utilizados en el diseño de mezcla. 2 para la presente optimización.

$\boldsymbol{m}$ = Cantidad de aperturas o tamices utilizadas en el diseño de mezcla = 9.

Las ecuaciones lineales necesarias para definir la optimización granulométrica son las siguientes:

$$r_1 = 0,37x_1 + 0x_2 - 8,86 \quad \textbf{(37)}$$
$$r_2 = 4,92x_1 + 0x_2 - 12,5 \quad \textbf{(12.8)}$$
$$r_3 = 16,38x_1 + 0,29x_2 - 17,70 \quad \textbf{(38)}$$
$$r_4 = 84,03x_1 + 0,31x_2 - 25,03 \quad \textbf{(12.10)}$$
$$r_5 = 89,7x_1 + 0,38x_2 - 35,39 \quad \textbf{(12.11)}$$
$$r_6 = 94,12x_1 + 1,05x_2 - 50,05 \quad \textbf{(12.12)}$$
$$r_7 = 99,75x_1 + 45,01x_2 - 70,75 \quad \textbf{(12.13)}$$
$$r_8 = 100x_1 + 80,06x_2 - 81,76 \quad \textbf{(12.14)}$$
$$r_9 = 100x_1 + 100x_2 - 100 \quad \textbf{(12.15)}$$

Al reducir operar los coeficientes x1 y x2 obtenemos:

$$r_1 = 0,37x_1 - 8,86$$

$$r_2 = 4,92x_1 - 12,5$$

$$r_3 = 16,09x_1 - 17,70$$

$$r_4 = 83,72x_1 - 25,03$$

$$r_5 = 89,32x_1 - 35,39$$

$$r_6 = 93,07x_1 - 50,05$$

$$r_7 = 54,74x_1 - 70,75$$

$$r_8 = 19,94x_1 - 81,76$$

$$r_9 = 0x_1 - 100$$

Luego de operar las columnas según el método de mínimos cuadrados se obtienen las sumatorias b9 y d1, donde b9 es la pendiente de la recta más cercana a los x ideales (Fuller-Thompson), mientras d1 el punto de intersección de la recta con el eje de las ordenadas.

Así la regresión por mínimos cuadrados se representa por la siguiente ecuación:

$$\boldsymbol{b_9 x_1 - d_1 = 0} \quad \textbf{(12.16)}$$

Donde el porcentaje ideal de arena para el diseño de mezcla de concreto es:

$$\%\, \boldsymbol{Arena} = \frac{\boldsymbol{d_1}}{\boldsymbol{b_9}} = \frac{\boldsymbol{15.767,06}}{\boldsymbol{27.326,83}} = \boldsymbol{57,7\% \cong 58\%}$$

Mientras que el % de grava en volumen por m³ de concreto es:

$$\%\boldsymbol{Grava} = \boldsymbol{1 - \%Arena}$$

$$\%\boldsymbol{Grava} = \boldsymbol{1 - 0,58 = 0,42 = 42\%}$$

El resumen del método de optimización por mínimos cuadrados para determinar el porcentaje ideal de los agregados fino y grueso para el diseño de mezcla de concreto es:

***Tabla 60.*** ***Resumen del método de optimización por mínimos cuadrados***

| Porcentajes reales vs Porcentajes ideales Fuller-Thompson | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| TAMIZ | TAMAÑO (mm) | Arena x1=%Pasa | Grava x2=%Pasa | Fuller-Thompson cj=100√dj/D=19 | x1-x2 | (x1-x2)^2 | cj(x1-x2) |
| 3/4" | 19 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 0,00 | 0 | 0 |
| 1/2" | 12,7 | 100,00 | 80,06 | 81,76 | 19,94 | 397,42 | 1.629,86 |
| 3/8" | 9,51 | 99,75 | 45,01 | 70,75 | 54,74 | 2.996,33 | 3.872,65 |
| N° 4 | 4,76 | 94,12 | 1,05 | 50,05 | 93,07 | 8.662,40 | 4.658,50 |
| N° 8 | 2,38 | 89,70 | 0,38 | 35,39 | 89,32 | 7.978,55 | 3.161,36 |
| N° 16 | 1,19 | 84,03 | 0,31 | 25,03 | 83,72 | 7.008,94 | 2.095,19 |
| N° 30 | 0,595 | 16,38 | 0,29 | 17,70 | 16,09 | 258,86 | 284,72 |
| N° 50 | 0,297 | 4,92 | 0,00 | 12,50 | 4,92 | 24,19 | 61,49 |
| N°100 | 0,149 | 0,37 | 0,00 | 8,86 | 0,37 | 0,14 | 3,30 |
| | | | | | | **27.326,83** | **15.767,06** |

| | |
|---|---|
| % Arena | 58% |
| %Grava | 42% |

*Fuente: Elaboración Propia*

## 12.9 Estimación del contenido de grava y arena

Sabemos que:

$$\mathbf{Vta} = \mathbf{1} - (\mathbf{Vc} + \mathbf{Va} + \mathbf{Vai}) \quad \textbf{(12.17)}$$

Donde:

**Vta** = Volumen total (agregado fino y grueso)

**Vc** = Volumen de cemento

**Va** = Volumen de agua

**Vai** = Volumen de aire.

Luego: $\mathbf{Vta} = \mathbf{1} - (\mathbf{Vc} + \mathbf{Va} + \mathbf{Vai})$

Entonces: $\mathbf{Vta} = \mathbf{1} - (\mathbf{0,13} + \mathbf{0,2} + \mathbf{0,02})$

$$\textbf{El volumen total } (\mathbf{Vta}) \textbf{ es } = \mathbf{0,65\ m^3}$$

## 12.10 Estimación del contenido de grava (En volumen)

Sabemos que Vta es de 0,65 m³ y que de la optimización se obtuvo que se requiere 42% de grava.

Por lo tanto, el volumen de grava $(\mathbf{Vg}) = \mathbf{Vta} * \mathbf{42}\%$

$$\mathbf{Vg} = \mathbf{0,65} * \mathbf{0,42} = \mathbf{0,27\ m^3 de\ grava\ /\ por\ m3\ de\ concreto}. \quad \textbf{(12.18)}$$

## 12.11 Estimación del contenido de arena (En volumen)

Sabemos que Vta es de 0,65 m³ y que de la optimización se obtuvo que se requiere 58% de arena.

Por lo tanto, el volumen de grava $(\mathbf{Vg}) = \mathbf{Vta} * \mathbf{58}\%$

$$\mathbf{Vg} = \mathbf{0,65} * \mathbf{0,58} = \mathbf{0,38\ m^3\ de\ arena\ /\ por\ m3\ de\ concreto}. \quad \mathbf{(12.19)}$$

## 12.12 Cálculo de la masa de agregado grueso.

Para ello se necesita calcular la densidad promedio.

$$\boldsymbol{dprom} = \%_{\boldsymbol{f}} * \boldsymbol{d_f} + \%_{\boldsymbol{g}} * \boldsymbol{d_g} \quad \mathbf{(12.20)}$$

Donde:

**d prom** = Densidad aparente promedio.

**dg** = Densidad aparente de la grava.

**df** = Densidad aparente de la grava.

**%f** = Porcentaje de la arena en forma decimal.

**%g** = Porcentaje de la grava en forma decimal.

$$\boldsymbol{dprom} = (\mathbf{2.474} * \mathbf{0,58}) + (\mathbf{2.154} * \mathbf{0,42})$$

$$\boldsymbol{dprom} = \mathbf{2.339,6}\ \boldsymbol{kg/m^3}$$

Entonces:

$$\boldsymbol{Masa\ agregado\ grueso = d_{prom} * Vta * \%\ grava\ optimizado} \quad \textbf{(12.21)}$$

$$\boldsymbol{Masa\ agregado\ grueso = 2.339,6 * 0,65 * 0,42}$$

$$\boldsymbol{Masa\ agregado\ grueso = 639\ kg/m^3}$$

## 12.13 Cálculo de masa de agregado fino.

$$\boldsymbol{Masa\ agregado\ fino = d_{prom} * Vta * \%\ arena\ optimizado} \quad \textbf{(12.22)}$$

$$\boldsymbol{Masa\ agregado\ fino = 2.339,6 * 0,65 * 0,58}$$

$$\boldsymbol{Masa\ agregado\ fino = 882\ kg/m^3}$$

***Tabla 61.*** ***Resumen cantidades de los componentes del concreto de acuerdo con el volumen***

| MATERIAL | PESO Kg/m3 | DENSIDAD Kg/m3 | VOLUMEN m3/m3 |
|---|---|---|---|
| Cemento | 426 | 3100 | 0,13 |
| Aire | 0 | 0 | 0,02 |
| Agua | 200 | 1000 | 0,2 |
| Grava | 639 | 2.339,6 | 0,27 |
| Arena | 882 | 2.339,6 | 0,38 |
| TOTAL | | | 1 |
| Relación a/c | 0,47 | | |

*Fuente: Elaboración Propia*

**12.14 Cálculo del peso del agregado grueso en estado húmedo (Ajuste de agregado por humedad natural).**

$$\boldsymbol{Mg = M(1 + Hg)} \quad \textbf{(12.23)}$$

Donde:

**Mg** = Peso húmedo de la grava

**M** = Peso de la grava seca en kg

**Hg** = Humedad natural de la grava en %

$$\boldsymbol{Mg = M(1 + Hg)}$$

$$\boldsymbol{Mg = 639(1 + 0.0464) = 669\ Kg\ de\ grava\ /m^3} \text{ de concreto}$$

**12.15 Cálculo del peso del agregado fino en estado húmedo (Ajuste de agregado por humedad natural).**

$$\boldsymbol{Mf = M(1 + Hf)} \quad \textbf{(12.24)}$$

Donde:

**Mf** = Peso húmedo de la arena

**M** = Peso de la arena seca en kg

**Hf** = Humedad natural de la arena en %

$$\boldsymbol{Mf = M(1 + Hf)}$$

$$\boldsymbol{Mg = 882(1 + 0.0459) = 923\ Kg\ de\ arena\ /m^3} \text{ de concreto}$$

## 12.16 Cálculo de la cantidad de agua real para utilizar en la mezcla

Datos agregado fino:

- **M** = Peso de la arena seca = 882 Kg
- **Absf** = Absorción del agregado fino = 2,94%
- **Hf** = Humedad del agregado fino= 4,59 %

**a.** Si la Hf > Abs f esto indica que el agregado tiene agua en exceso, por lo tanto, hay que quitarle agua a la mezcla.

$$\boldsymbol{Af = M(Hf - Absf)} \quad \textbf{(12.25)}$$

**b.** Si la Hf < Abs f esto indica que el agregado necesita agua para llegar al estado SSS, por lo tanto, hay que agregarle agua.

$$\boldsymbol{Af = M(Hf + Absf)} \quad \textbf{(12.26)}$$

En este caso Hf > Abs f, por lo tanto, hay que quitar agua.

$$\boldsymbol{Af = M(Hf - Absf)}$$

$$\boldsymbol{Af = 882(0,0459 - 0,0294)}$$

14,55 kg de agua /m³ de concreto

## 12.17 Calculo cantidad de agua real para utilizar en la mezcla

Datos agregado grueso:

- **M** = Peso de la grava seca = 639 Kg
- **Ag** = Absorción = 8,1 %
- **Hg** = Humedad = 4,64 %

**a.** Si la Hg > Abs g esto indica que el agregado tiene agua en exceso, por lo tanto, hay que quitarle agua a la mezcla.

$$\boldsymbol{Ag = M(Hg - Absg)} \quad \textbf{(12.27)}$$

**c.** Si la Hg < Abs g esto indica que el agregado necesita agua para llegar al estado SSS, por lo tanto, hay que agregarle agua.

$$\boldsymbol{Ag = M(Hg + Absg)} \quad \textbf{(12.28)}$$

En este caso Hg < Abs g, por lo tanto, hay que agregar agua.

$$\boldsymbol{Ag = M(Hg + Absg)}$$

$$\boldsymbol{Af = 639(0,0464 - 0,081)}$$

81,4 kg de agua /m³ de concreto

**12.18 Calculo total de agua en exceso en kg.**

$$\boldsymbol{A = Ag + Af} \quad \textbf{(12.29)}$$

$$\boldsymbol{A = 81,4 + 14,55}$$

$$\boldsymbol{A = 95,95\ kg}$$

De tal manera que la cantidad de la nueva agua de mezclado será:

$$\boldsymbol{Agua\ de\ mezclado - Agua\ en\ exceso} \quad \textbf{(12.30)}$$

$$\boldsymbol{(200 - 95,95)hg}$$

$$\boldsymbol{104.05\ kg\ por\ m^3\ de\ concreto}$$

Se realiza la nueva tabla resumen con todos los nuevos datos y las correcciones por humedad.

Pero como el agua cambió, también cambia la cantidad de cemento.

$$C = \left[\frac{a}{a/c}\right] \quad \textbf{(12.1)}$$

Donde:

**C** = Cantidad de cemento en kg.

**a** = Cantidad de agua en kg.

**a/c** = Relación agua-cemento.

$$C = \left[\frac{200}{0,47}\right] = 221\ kg$$

***Tabla 62. Cantidades para 1 m³ de concreto ajustado por humedad***

| MATERIAL | PESO Kg/m3 | DENSIDAD Kg/m3 | VOLUMEN m3/m3 | Pesos para mezclar ajustado por humedad (kg/m3) |
|---|---|---|---|---|
| Cemento | 426 | 3100 | 0,13 | 221 |
| Aire | 0 | 0 | 0,02 | 0,00 |
| Agua | 200 | 1000 | 0,20 | 104,05 |
| Grava | 639 | 2154 | 0,27 | 669 |
| Arena | 882 | 2474 | 0,38 | 923 |
| TOTAL | | | 1 | |
| Relación a/c | 0,47 | | | 0,47 |

*Fuente: Elaboración Propia*

*:*

Se puede dejar la misma cantidad de cemento inicial, para mejorar la durabilidad del elemento estructural, con esto se obtendría una relación a/c de 0.24. Aunque no es necesario puesto que las condiciones ambientales del proyecto son benéficas para la obra.

## 12.19 Entrega de la dosificación teórica de la mezcla.

**C** = Cemento

**A** = Arena

**G** = Grava

**C: A: G**

Esta dosificación se expresa en peso del cemento.

221/221: 923/221: 669/221

**1:5:4**

Se observa que la cantidad de arena es mayor a la grava, esto se debe a que, a la muestra original, le faltaban finos. Debido al proceso de optimización del agregado.

Con lo anterior, se procede a dosificar la muestra de prueba, es decir se determinan las cantidades necesarias para realizar el ensayo de asentamiento utilizando el cono de Abrams con 1/50 partes del m³ diseñado.

***Tabla 63.*** ***Cantidades para mezcla de prueba ajustadas por humedad***

| MATERIAL | Pesos para mezclar ajustado por humedad 1/50 partes del m3 |
|---|---|
| Cemento | 4,42 |
| Aire | 0 |
| Agua | 2,08 |
| Grava | 13,38 |
| Arena | 18,46 |
| TOTAL | 38.16 |
| Relación a/c | 0,47 |

*Fuente: Elaboración Propia*

# 13 ENSAYO DE ASENTAMIENTO DEL CONCRETO

El ensayo descrito a continuación fue realizado el día 10 de mayo de 2023 en el Laboratorio de suelos y pavimentos de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de la facultad Tecnológica.

La estimación del asentamiento del concreto permite identificar de manera indirecta el grado de manejabilidad del concreto estructural en estado plástico a la hora de su colocación, siguiendo las recomendaciones de la norma NTC 396 los materiales y el procedimiento es el siguiente:

## MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS

Para realizar el ensayo de asentamiento a la mezcla de concreto estructural se utilizaron los siguientes materiales y equipos

- Molde tronco cónico de 305 mm de alto, el cual cumple las especificaciones de la Norma Técnica Colombiana NTC 396; este, cuenta con agarraderas para sujetarlo con los pies durante el ensayo.
- Varilla compactadora de acero de 600 mm de longitud y 16 mm de diámetro.
- 2 muestras de concreto (standard y con adición de ceniza de madera en un 20 %)
- Palustre.
- Cuchara.

**PROCEDIMIENTO GENERAL DEL ENSAYO**

Inicialmente se prepara el molde troncocónico humedeciéndolo internamente, además debe ser colocado sobre una superficie horizontal, rígida y plana también en condición húmeda para evitar que absorba el agua de mezcla. Esta se sujeta firmemente con los pies y se llena con la muestra de concreto en tres capas, cada una de las capas se compacta 25 veces, es decir con 25 golpes 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 algún movimiento torsional o aplicar vibración.

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.

## 13.1 Asentamiento concreto standard (Sin adición de ceniza de madera)

Fotografía 40. ***Materiales para ensayo de asentamiento***



***Fuente: Elaboración Propia***

Fotografía 41. ***Asentamiento para arreglo Estándar***



***Fuente: Elaboración Propia***

## 13.2 Asentamiento concreto con adición de ceniza de madera

Fotografía 43. ***Asentamiento arreglo con sustituto I***



***Fuente: Elaboración Propia***

Fotografía 42. ***Asentamiento arreglo con sustituto II***



***Fuente: Elaboración Propia***

**RESULTADOS OBTENIDOS**

Luego de realizar los ensayos de asentamiento al concreto estructural se obtuvieron los siguientes datos:

***Tabla 64. Resultados finales para ensayo de asentamiento del concreto para los dos arreglos experimentales***

| DATOS OBTENIDOS DURANTE EL ENSAYO | | | |
|---|---|---|---|
| **Muestra** | **Lectura (cm)** | **Asentamiento (cm)** | **Asentamiento (mm)** |
| Concreto Standard | 24,75 | 5,75 | 57,5 |
| Concreto con sustitución al agregado fino en un 20% de ceniza de madera | 17,3 | 13,2 | 132 |
| Concreto con sustitución al agregado fino en un 20% de ceniza de madera | 24 | 6 | 60 |

***Fuente: Elaboración Propia***

El grado de asentamiento de cada una de las muestras se calculó a través de la siguiente ecuación:

$$Asentamiento = 30{,}5 - altura\ en\ cm\ despues\ del\ asentamiento \quad (13.1)$$

## INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

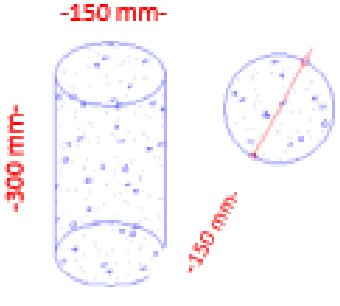
Una vez realizado el ensayo de asentamiento en las muestras se identificó que para la mezcla standard, sin adición de ceniza como sustituto del agregado fino se obtuvo un asentamiento correspondiente al rango para trabajabilidad media entre 5 y 10 cm.

En cambio, para la mezcla con sustitución de ceniza de madera en un 20% se obtuvo un asentamiento mayor al rango recomendado por la adición errónea de agua en exceso lo cual generó una plasticidad mayor. Por ende, se realizó una segunda muestra para este arreglo y se obtuvo finalmente un asentamiento correspondiente al proyectado inicialmente dentro del rango previsto.

### 13.3 Cantidades definitivas para 6 probetas cilíndricas

Teniendo definidas las cantidades de materiales por $m3$, procedemos a calcularlas para 6 probetas cilíndricas cada una presentando las siguientes dimensiones:

***Tabla 65.*** ***Dimensiones de la probeta cilíndrica***




| DIMENSIONES PROBETA CILINDRICA | |
|---|---|
| Altura (mm) | 0,30 |
| Diámetro (mm) | 0,15 |
| Volumen (m3) | 0,01 |
| Cantidad | 6,00 |
| Volumen Total (m3) | 0,03 |

*Fuente: Elaboración Propia*

Conociendo el volumen total de concreto requerido para llenar cada una de las probetas siendo de 0,0055 $m3$, además de incluir una merma del 10% obtenemos las siguientes cantidades definitivas:

**Para las 3 probetas cilíndricas sin adición de ceniza de madera:**

*Tabla 66. Cantidades definitivas para dosificación de concreto estándar*

| Cantidades Definitivas para dosificación de concreto standard de 21 Mpa | | Cantidades con desperdicio del 10% |
|---|---|---|
| Cemento (kg) | 3,5 | 3,85 |
| Agua (kg) | 1,72 | 1,89 |
| Agregado grueso (kg) | 11,04 | 12,14 |
| Agregado fino (kg) | 15,23 | 16,75 |

*Fuente: Elaboración Propia*

**Para las 3 probetas cilíndricas con adición de ceniza de madera (20%):**

*Tabla 67. Cantidades definitivas para dosificación de concreto con sustituto parcial*

| Cantidades Definitivas para dosificación de concreto con adición de ceniza de madera (20%) de 21 Mpa | | Cantidades con desperdicio del 10% |
|---|---|---|
| Cemento (kg) | 3,5 | 3,85 |
| Agua (kg) | 1,72 | 1,89 |
| Agregado grueso (kg) | 11,04 | 12,14 |
| Agregado fino (kg) | 12,84 | 14,12 |
| Ceniza de madera (kg) | 3,05 | 3,36 |

*Fuente: Elaboración Propia*

# 14 FUNDICIÓN DE PROBETAS CILÍNDRICAS DE CONCRETO

El ensayo descrito a continuación fue realizado el día 16 de mayo de 2023 en el Laboratorio de suelos y pavimentos de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de la facultad Tecnológica.

## MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS

Para la fundición de los cilindros de concreto estructural standard y con adición de ceniza de madera (20%) como sustituto parcial del agregado fino se utilizaron los siguientes materiales y equipos:

- 6 moldes cilíndricos metálicos de 150 mm de diámetro, con altura de 300 mm de acuerdo con las especificaciones de la NTC – 1377.
- Varilla compactadora corta de 10 mm de diámetro y 300 mm de longitud.
- Balanza para dosificación de material de acuerdo con el diseño de mezcla.
- Mezcladora de concreto (Trompo).
- 1 juego de tamices.
- Martillo de caucho.
- Palustre.
- Llana metálica.

**PROCEDIMIENTO GENERAL**

Inicialmente se separó y clasificó 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 – 174 tanto para agregado grueso como para agregado fino.

Fotografía 45. ***Material para fundición de probetas cilíndricas***



***Fuente: Elaboración Propia***

Fotografía 44. ***Trompo o mezclador de concreto***



***Fuente: Elaboración Propia***

Una vez se prepara el material con las cantidades correspondientes, se humedecen las superficies de los materiales, es decir, la superficie interna de cada una de las probetas, las paredes del trompo y la herramienta menor.

Fotografía 47. ***Camisas cilíndricas 6x12 pulgadas para fundición***



***Fuente: Elaboración Propia***

Fotografía 46. ***Preparación trompo para mezclar***



***Fuente: Elaboración Propia***

Como paso siguiente, se inició el proceso de mezclado vertiendo los componentes de la mezcla al interior del trompo de la siguiente manera: se incluyó la cantidad de agregado grueso en kg perfectamente gradado, junto con un 30% de la cantidad del agua 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 dentro del equipo por otros 50 segundos.

Fotografía 48. ***Adición de la ceniza de madera***



***Fuente: Elaboración Propia***

Fotografía 49. ***Fundición de probeta cilíndrica***



***Fuente: Elaboración Propia***

Al realizar el diseño de mezcla se calculó la cantidad necesaria en kg para fundir las probetas de los dos arreglos experimentales previendo un desperdicio del 10 %, por lo que no es necesario reponer la cantidad de mortero adherida en el equipo, además cada una de las probetas fue lubricada con aceite vegetal para reducir la adherencia de la mezcla a las paredes de los cilindros; la mezcla fue vertida 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 150 mm de diámetro por 300 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 para mantener una superficie adecuada, luego, los cilindros se dejan reposar un periodo de 24 horas para que alcancen una consistencia endurecida.

Fotografía 50. ***Probetas cilíndricas después de 24 horas***



***Fuente: Elaboración Propia***

Se finaliza el proceso, desencofrando las probetas y luego colocándolas inmediatamente en un ambiente húmedo garantizando esta condición sobre toda su área superficial en todo momento hasta que se cumplan los tiempos en los que se deba hacer el ensayo de la resistencia a la compresión.

Fotografía 51. ***Desencofrado de probetas cilíndricas***



***Fuente: Elaboración Propia***

Fotografía 52. ***Disposición de probetas cilíndricas para iniciar curado I***



***Fuente: Elaboración Propia***

Fotografía 53. ***Disposición de probetas cilíndricas para iniciar curado II***



***Fuente: Elaboración Propia***

Cabe resaltar que la universidad cuenta con cámaras de curado pero que al estar en cierre de semestre los espacios estaban ocupados y se recurrió a disponer de otros medios para realizar el proceso de curado como lo fueron las canecas con agua.

# 15 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS DE CONCRETO

El ensayo para determinar la resistencia a la compresión de los cilindros de concreto fue realizado los días 24, 31 de mayo y 7 junio de 2023 en el Laboratorio de suelos y pavimentos de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de la facultad Tecnológica.

Este determina si la variable de respuesta de los dos arreglos experimentales (un diseño de mezcla de concreto estructural standard, es decir sin ninguna especificación o modificación de sus características y otro que tiene una sustitución del agregado fino por ceniza de madera en un 20%). El ensayo de resistencia a la compresión medirá el desarrollo de esta característica a los 7, 14 y 28 días, a un total de 6 probetas cilíndricas de 150 mm de a diámetro por 300 mm de altura.

## 15.1 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.
- 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 un cilindro para cada uno de los periodos especificados; 3 correspondientes a un diseñó de mezcla de concreto estructural estándar y 3 cilindros para concreto estructural con ceniza de madera como sustituto parcial del agregado fino en un 20 %.

## 15.2 PROCEDIMIENTO GENERAL DEL ENSAYO

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 68. Edad de ensayo probetas cilíndricas***

| Edad de ensayo | Tolerancia permisible |
|---|---|
| 24 h | ± 0,5 h ó 2,1 % |
| 3 d | 2 h ó 2,8 % |
| 7 d | 6 h ó 3,6 % |
| 14 d | 6 h ó 3,6 % |
| 28 d | 20 h ó 3,0 % |

*Fuente: Tomado de NTC 673. Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto.*

Teniendo en cuenta los rangos de tolerancia para los periodos de tiempo especificados, se toma la medida del diámetro y altura de la muestra 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 el eje del elemento que ejercerá presión sobre la muestra. Después, se verifica que la máquina 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, no ejerce ninguna fuerza sobre la probeta. Posterior a ello se aplica una carga constante sobre el cilindro hasta que finalmente alcanza la falla. Allí se reporta la carga máxima a la que falla la probeta.

## 15.3 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 la resistencia desarrollada de cada una de las muestras se utiliza la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{P}{A} \qquad \textbf{(15.1)}$$

Dónde:

$\boldsymbol{\sigma}$ = Esfuerzo de falla de cada una de las probetas KPa.

$\boldsymbol{P}$ = Fuerza máxima registrada por la máquina KN.

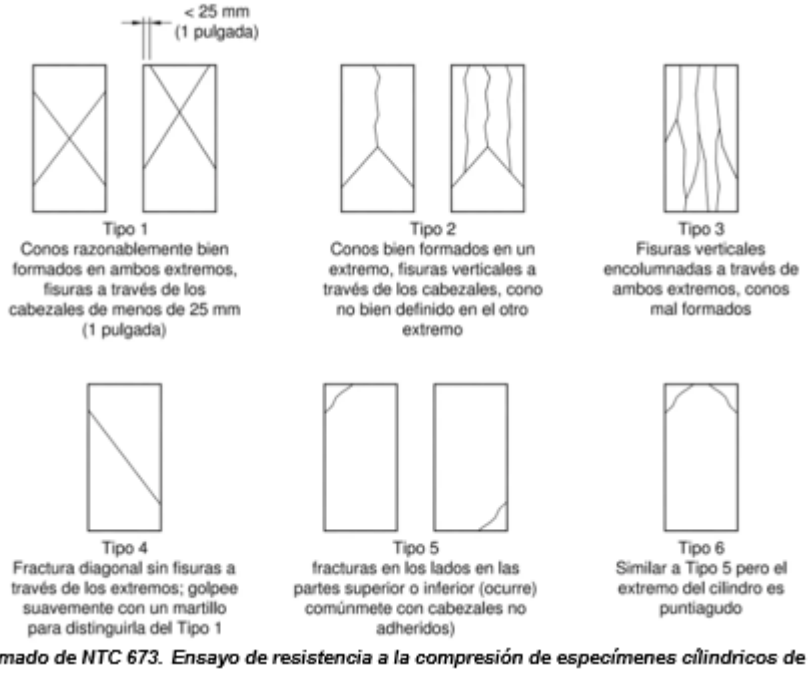
$\boldsymbol{A}$ = Área de la probeta m².

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

$$A = \pi * \frac{D^2}{4} \qquad \textbf{(15.2)}$$

Para finalizar se reporta el tipo de falla de cada una de las muestras, teniendo en cuenta la siguiente imagen:

***Tipos de falla cilindros de concreto***




***Fuente: Tomado de NTC 673. Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto.***

Los resultados obtenidos al fallar las 6 probetas cilíndricas para los dos arreglos experimentales en las edades correspondientes son los siguientes:

***Tabla 69. Resultados Resistencia a compresión cilindros de concreto Estándar***

| RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN CILINDROS DE CONCRETO STANDARD (SIN SUSTITUTO PARCIAL DEL AGREGADO FINO) | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Día de falla | Probeta N° | ϕ(cm) | Altura (cm) | Área (cm2) | Volumen (cm3) | Peso (g) | Densidad (kg/m3) | Carga (KN) | σ en Mpa | % Res | Tipo de falla |
| 7 | 1 | 15,10 | 30,10 | 179,08 | 5390,27 | 11802,00 | 2189,50 | 318,30 | 17,77 | 84,64 | 2 |
| 14 | 2 | 15,20 | 30,10 | 181,46 | 5461,90 | 11792,67 | 2159,08 | 398,12 | 21,94 | 104,48 | 2 |
| 28 | 3 | 15,15 | 30,20 | 180,27 | 5444,05 | 12226,70 | 2245,88 | 419,78 | 23,29 | 110,89 | 5 |

***Fuente: Elaboración Propia***

***Tabla 70. Resultados Resistencia a compresión cilindros de concreto con ceniza de madera***

| RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN CILINDROS DE CONCRETO CON ADICIÓN DE CENIZA DE MADERA (20%) COMO SUSTITUTO PARCIAL DEL AGREGADO FINO | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Día de falla | Probeta N° | ϕ(cm) | Altura (cm) | Área (cm2) | Volumen (cm3) | Peso (g) | Densidad (kg/m3) | Carga (KN) | σ en Mpa | % Res | Tipo de falla |
| 7 | 4 | 15,15 | 30,30 | 180,27 | 5462,08 | 10962,67 | 2007,05 | 303,27 | 16,82 | 80,11 | 2 |
| 14 | 5 | 15,10 | 30,50 | 179,08 | 5461,90 | 10964,33 | 2007,42 | 402,11 | 22,45 | 106,92 | 5 |
| 28 | 6 | 15,00 | 30,20 | 176,71 | 5336,78 | 10994,15 | 2060,07 | 425,95 | 24,10 | 114,78 | 2 |

***Fuente: Elaboración Propia***

## 15.4 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Para finalizar se establece de acuerdo con los resultados obtenidos que la resistencia presentada para el arreglo experimental estándar alcanzó a la edad de 28 días una resistencia superior al 10.89 % pero que a edad de 7 días estuvo por debajo, es decir en un 84% justificable al tratarse de una edad temprana para la curva de resistencia normal en este tipo de ensayos.

En cuanto al arreglo experimental con sustitución de ceniza de madera como sustituto parcial del agregado fino, se evidenció una resistencia levemente mayor a la obtenida en el arreglo estándar, en un 14.78 % a la resistencia deseada. Lo que impulsa a seguir desarrollando esta iniciativa de implementar el aprovechamiento de recursos que se desechan y que pueden mitigar la explotación de los recursos naturales como lo hace la industria de la construcción.

## 15.5 CÁLCULO DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD

El módulo de elasticidad de la pasta de cemento depende netamente del agregado fino, en donde a mayor sea su densidad, mayor es su módulo de elasticidad, para el caso de agregados finos de peso normal.

La norma Sismorresistente del 2010 (NSR-10), plantea para el cálculo de módulo de elasticidad la siguiente ecuación:

$$\boldsymbol{Ec = \lambda * 4700\sqrt{f'c}} \quad \textbf{(15.3)}$$

La norma Sismorresistente del 2010 especifica en el título C.8.5.1, una ecuación para el cálculo del módulo de elasticidad del concreto, teniendo en cuenta su densidad.

$$\boldsymbol{Ec = Wc^{1,5} * 0,043\sqrt{f'c}} \quad \textbf{(15.4)}$$

Dónde:

$Ec$ = Módulo de elasticidad del concreto.

$\lambda$ = Factor modificador, coeficiente que depende la densidad del concreto.

$f'c$ = Resistencia a la compresión del concreto desarrollada a los 28 días (MPa).

$Wc$ = Densidad del concreto en estado seco (Entre 1440 y 2560 kg/m$^3$).

La NSR-10 exige la utilización del factor modificador para el cálculo del módulo de elasticidad para otras especificaciones en el concreto y para ello se especifica el uso de los siguientes coeficientes:

***Tabla 71. Factor modificador para determinar módulo de elasticidad***

| Factor modificador $\lambda$ | Descripción de uso |
|---|---|
| $\lambda = 0{,}75$ | Para otros concretos de peso liviano |
| $0{,}75 < \lambda < 0{,}85$ | Se permite la interpolación de estos valores con base a fracciones volumétricas, cuando se ha reemplazado un porcentaje de agregado fino de peso liviano, por agregado fino de peso normal |
| $\lambda = 0{,}85$ | Usado para el cálculo de Ec en concreto liviano con agregado fino de peso normal |
| $0{,}85 < \lambda < 1{,}00$ | Se permite la interpolación del factor modificador para concreto que contiene agregado fino de peso normal y una porción de agregado grueso liviano y agregado de peso normal |
| $\lambda = 1{,}00$ | Para concreto de peso normal |

***Fuente: Tomado de. ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA. Norma Sismoresistente de 2010. Bogotá D.C. 2012.***

***Tabla 72. Análisis del módulo de elasticidad respecto al tiempo en distintas edades para arreglo estándar***

| Día de falla | Probeta N° | Volumen (cm3) | Peso (g) | Densidad (kg/m3) | σ en Mpa | E [1] | E[2] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 7 | 4 | 5462,08 | 10962,67 | 2007,05 | 16,82 | 19277,51 | 15858,38 |
| 14 | 5 | 5461,9 | 10964,33 | 2007,42 | 22,45 | 22271,36 | 18326,30 |
| **28** | **6** | **5336,78** | **10994,15** | **2060,07** | **24,10** | **23075,26** | **19739,71** |

***Fuente: Elaboración Propia***

# 16 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez se tienen los datos del ensayo de resistencia a la compresión para los dos arreglos experimentales y para cada una de las edades se debe realizar un análisis de resultados con el fin de determinar si el arreglo experimental además de cumplir el requisito de resistencia presentan alta calidad; para ello se utilizan los parámetros estadísticos descritos en la Norma Técnica Colombiana NTC – 2275 (Procedimiento Recomendado Para la Evaluación de los Resultados de los Ensayos de Resistencia del Concreto).

## 16.1 PROPIEDADES DEL CONCRETO ESTRUCTURAL EN ESTADO FRESCO

Para evaluar las propiedades del concreto en estado fresco se realizó el ensayo de asentamiento del concreto siguiendo las especificaciones de la normativa NTC 396. Este se realizó en el laboratorio de suelos y pavimentos de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas – Facultad Tecnológica a su vez apoyado por la monitoria del área y la ingeniera Lina Lancheros quien se desempeña labores para el coordinador de laboratorios de la facultad.

### 16.1.1 Consistencia, trabajabilidad y homogeneidad

Para caracterizar el comportamiento del concreto en estado fresco se realiza el ensayo de asentamiento, este ensayo indica su consistencia, en otras palabras, su capacidad para adaptarse al molde con facilidad e indica que tan seco o fluido está el concreto. La consistencia se modifica fundamentalmente por variaciones del contenido de agua de mezcla y otro aspecto como la temperatura puede influir en su desarrollo.

La trabajabilidad del concreto es usualmente evaluada por un examen visual, debido que hasta el momento no se conoce ningún ensayo que mida la propiedad de manera directa.

La trabajabilidad se modifica con el transcurso del tiempo. El valor del asentamiento medido al pie de la mezcladora será mayor que el obtenido luego de 15 minutos, pues los agregados absorben

agua que, de esta manera, no contribuye a la plasticidad. En efecto, en el tiempo que los materiales permanecen en la mezcladora, los agregados no agotan su capacidad de absorción.

No debe confundirse el concepto de consistencia con el de trabajabilidad, que en su aceptación más amplia expresa la propiedad del concreto para ser mezclado con facilidad, brindando un material homogéneo, capaz de ser transportado, colocado en molde sin segregar con la mayor capacidad

**Homogeneidad**

En el proceso de producción del concreto, la prueba de asentamiento es de gran utilidad en el control de las variaciones en los materiales. En efecto, un cambio en el contenido de humedad de la arena o la variación del módulo de finura, son fácilmente advertidas en la prueba pues influyen en el valor del asentamiento.

La homogeneidad puede perderse por segregación (separación de los gruesos por una parte y los finos por otra) O por decantación (los granos gruesos caen al fondo y el mortero queda en la superficie, cuando la mezcla es muy líquida). Ambos fenómenos aumentan con el contenido de agua, con el tamaño máximo del árido, con las vibraciones o sacudidas durante el transporte y con la puesta en obra en caída libre.

**Perdida de asentamiento**

La pérdida de asentamiento es la reducción en la altura del cono del concreto fresco después de haber sido removido en el ensayo de asentamiento. Estas pérdidas ocurren naturalmente con el tiempo debido a la gravedad y la evaporación del agua en la mezcla. Sin embargo, una pérdida excesiva de asentamiento puede indicar una falta de trabajabilidad o plasticidad en la mezcla, lo

que puede ocasionar dificultades de colocación y una calidad reducida del concreto final. Es importante controlar cuidadosamente la cantidad de agua y otros ingredientes en la mezcla para asegurar pérdidas por asentamiento aceptables y asegurar la mejor calidad del concreto final. Algunas de las consecuencias de la pérdida de asentamiento pueden incluir:

**1. Resistencia y durabilidad reducidas:** la pérdida por deslizamiento excesiva puede crear cavidades o vacíos en el concreto, lo que reduce su resistencia y durabilidad.

**2. Apariencia de superficie dañada:** La pérdida de inmersión también puede resultar en una apariencia de superficie dañada con áreas ásperas, agrietadas o picadas.

**3. Problemas de seguridad:** la pérdida de hormigón que forma estructuras de soporte, como columnas o paredes, puede generar problemas de seguridad a largo plazo.

El sangrado, por otro lado, es una mezcla demasiado húmeda o la proporción incorrecta entre los materiales utilizados en la mezcla. Es importante controlar la cantidad de agua y la composición de la mezcla para garantizar una pérdida por asentamiento y una escorrentía aceptable y obtener la mejor calidad final del concreto.

Para los dos arreglos experimentales en el diseño de mezcla se estableció que de acuerdo al elemento estructural a construir (columna) un asentamiento de 6 centímetros con una consistencia media era el apropiado.

Esto se confirma por medio de la tabla 50 en el diseño de mezcla presentado anteriormente en este trabajo.

*Tabla 50.* *Asentamiento recomendado según especificaciones*

| 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 progección neumática (lanzados) | Secciones sujetas a vibración estrema, 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 operadoas manualmente | Secciones simplemente reforzadas, con vibración |
| Media | 50-100 | Pavimentos compactados a mano, lozas 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) |

*Fuente: Tomado de SÁNCHEZ, Diego: Practical Method for Design Mixes of Normal Weight Concrete – Based on A.C.I 211.1*

Con base a los resultados obtenidos para los dos arreglos experimentales se puede establecer lo siguiente:

#### 16.1.1.1 Análisis del Asentamiento realizado al arreglo experimental estándar

Una vez realizado el ensayo de asentamiento del concreto se evidenció que la mezcla presentaba un grado de fluidez aceptable, es decir sin exceso de agua para lograr así una consistencia seca pero suficientemente fluida para obtener el asentamiento requerido.

***Fotografía 41. Asentamiento para arreglo Estándar***



***Fuente: Elaboración Propia***

En cuanto a la trabajabilidad está se evaluó por medio de la inspección visual de la mezcla en el momento en el que se realizó su colocación en el cono de Abrams presentándose fluida y fácil de manejar.

Hay que resaltar que en este diseño no se incluyó el uso de aditivos que podrían mantener las condiciones de trabajabilidad por un periodo de tiempo prolongado de acuerdo con el tipo que se utilice.

Para evaluar la homogeneidad, el ensayo de asentamiento permitió evidenciar si la proporción de los agregados y los demás componentes de la mezcla de concreto se comportaron de manera uniforme y se compactan satisfactoriamente sin presentar segregación (separación de los gruesos por una parte y los finos por otra) o decantación (los granos gruesos caen al fondo y el mortero queda en la superficie).

#### 16.1.1.2 Análisis del Asentamiento realizado al arreglo experimental con ceniza de madera como sustituto parcial (20%) del agregado fino

Una vez realizado el primer ensayo de asentamiento del concreto para este arreglo, se evidenció que la mezcla presentaba un grado de fluidez alta porque se agregó un exceso de agua por equivocación, lo cual no permitió alcanzar la consistencia requerida. A lo que se tuvo que realizar un segundo ensayo de asentamiento que posteriormente tuvo una consistencia similar a la del arreglo estándar, pero con menos asentamiento en 1.5 cm pero dentro del rango propuesto en el diseño de mezcla.

*Fotografía 42. Asentamiento arreglo con sustituto I*



*Fuente: Elaboración Propia*

*Fotografía 43. Asentamiento arreglo con sustituto II*



*Fuente: Elaboración Propia*

En cuanto a la trabajabilidad para este arreglo experimental, está se evaluó por medio de la inspección visual al igual que para el arreglo estándar cuando se realizó la colocación de la mezcla en el cono de Abrams está presentándose demasiada fluida por su exceso de agua en el primer ensayo que se realizó.

Para el Segundo ensayo realizado se identificó propiedades similares al arreglo estándar con una trabajabilidad media y fácil de colocar.

Hay que resaltar que en este diseño tampoco se incluyó el uso de aditivos retardantes para prolongar las condiciones de manejabilidad.

Para evaluar la homogeneidad, el ensayo de asentamiento permitió evidenciar si la proporción de los agregados y los demás componentes de la mezcla de concreto se comportaron de manera uniforme y se compactaron satisfactoriamente sin presentar segregación o decantación.

En resumen, los resultados obtenidos en el ensayo de asentamiento para los dos arreglos experimentales son los siguientes:

***Tabla 64. Resultados finales para ensayo de asentamiento del concreto para los dos arreglos experimentales***

| DATOS OBTENIDOS DURANTE EL ENSAYO | | | |
|---|---|---|---|
| Muestra | Lectura (cm) | Asentamiento (cm) | Asentamiento (mm) |
| Concreto Standard | 24,75 | 5,75 | 57,5 |
| Concreto con adición de ceniza | 17,3 | 13,2 | 132 |
| Concreto con adición de ceniza | 24 | 6 | 60 |

*Fuente: Elaboración Propia*

## 16.2 PROPIEDADES DEL CONCRETO ESTRUCTURAL EN ESTADO ENDURECIDO

### 16.2.1 Análisis de la Resistencia a la compresión

El ensayo para determinar la resistencia a la compresión de los cilindros de concreto fue realizado los días 24, 31 de mayo y 7 junio de 2023 en el Laboratorio de suelos y pavimentos de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de la facultad Tecnológica.

Este determina si la variable de respuesta de los dos arreglos experimentales (un diseño de mezcla de concreto estructural standard, es decir sin ninguna especificación o modificación de sus características y otro que tiene una sustitución del agregado fino por ceniza de madera en un 20%). Cumple con las especificaciones que requiere la normativa colombiana para concreto estructural de peso normal.

El ensayo de resistencia a la compresión medirá el desarrollo de esta característica a los 7, 14 y 28 días, a un total de 6 probetas cilíndricas de 150 mm de a diámetro por 300 mm de altura.

#### 16.2.1.1 Cilindros de concreto standard y con ceniza de madera como sustituto parcial del agregado fino (7 días)

El día 24 de mayo del 2023 se fallaron los primeros 2 cilindros correspondientes a la mezcla de concreto estructural fabricado con la condición de un concreto standard sin modificaciones en el diseño de mezcla y con la sustitución de ceniza de madera en un 20% por el agregado fino. Cada uno de los cilindros se sacó de la piscina de curado luego de estar allí por 7 días, estos fueron secados al aire para para luego fallarlos en una máquina la cual cumple las características descritas en la norma técnica NTC – 673.

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

Fotografía 54. ***Cilindros de concreto dispuestos a fallo***



***Fuente: Elaboración Propia***

Fotografía 55. ***Masa de cilindro de concreto***



***Fuente: Elaboración Propia***

Fotografía 57. ***Falla de cilindro o con ceniza a 7 días***



***Fuente: Elaboración Propia***

Fotografía 56. ***Fallo de cilindro estándar a 7 días***



***Fuente: Elaboración Propia***

De las anteriores imágenes correspondientes al fallo de los cilindros a los 7 días de edad podemos observar que el tipo de falla más común fue la falla cónica dividida tipo 2, esta falla se presenta en cilindros a los cuales se le aplicó una carga a compresión total.

#### 16.2.1.2 Cilindros de concreto standard y con ceniza de madera como sustituto parcial del agregado fino (14 días)

El ensayo de resistencia a la compresión de los cilindros de concreto a la edad de 14 días se realizó el 31 de mayo de 2023, tomando un cilindro por cada arreglo experimental, los cuales arrojaron los siguientes resultados y registros fotográficos.

Fotografía 58. ***Fallo de cilindro estándar a 14 días***



***Fuente: Elaboración Propia***

Fotografía 59. ***Fallo de cilindro con ceniza a 14 días***



***Fuente: Elaboración Propia***

Las imágenes correspondientes al fallo de los cilindros a los 14 días de edad muestran que el tipo de falla evidenciado fue la falla cónica dividida tipo 2 para el arreglo standard, mientras que para el arreglo con sustitución de ceniza fue tipo 5 la cual se caracteriza por fractura en la parte superior e inferior y en la parte lateral del cilindro producto de la no adherencia de los cabezales.

#### 16.2.1.3 Cilindros de concreto standard y con ceniza de madera como sustituto parcial del agregado fino (28 días)

El ensayo de resistencia a la compresión de los cilindros de concreto a la edad de 28 días se realizó el 7 de junio de 2023, tomando un cilindro por cada arreglo experimental, los cuales arrojaron los siguientes resultados y registros fotográficos.

Fotografía 60. ***Cilindros de concreto dispuesto a fallo***



***Fuente: Elaboración Propia***

Fotografía 61. ***Fallo de cilindro estándar a 28 días***




***Fuente: Elaboración Propia***

Fotografía 63. ***Fallo de cilindro estándar a 28 días***



***Fuente: Elaboración Propia***

Fotografía 62. ***Fallo de cilindro con ceniza a 28***



***Fuente: Elaboración Propia***

Las imágenes correspondientes al fallo de los cilindros a los 28 días de edad muestran que el tipo de falla más común fue la falla cónica dividida tipo 2 para el arreglo con sustitución de ceniza de madera mientras que para el arreglo estándar se presentó una combinación de cónica dividida tipo 2 y tipo 5 con fractura en la parte superior – lateral del cilindro, esta falla se presenta en cilindros

a los cuales se le aplicó una carga a compresión total para tipo 2 y con falta de adherencia de los cabezales para tipo 5.

***Tabla 73. Análisis Resultados Resistencia a compresión cilindros de concreto Estándar***

| CONCRETO ESTRUCTURAL STANDARD (SIN SUSTITUTO PARCIAL DEL AGREGADO FINO) | | | |
|---|---|---|---|
| **Edad** | **Resistencia (Mpa)** | **% Resistencia desarrollada respecto a f'c** | **% Resistencia desarrollada respecto a f'cr** |
| 7 | 17,77 | 84,64 | 60,66 |
| 14 | 21,94 | 104,48 | 74,88 |
| 28 | 23,29 | 110,89 | 79,48 |

***Fuente: Elaboración Propia***

***Tabla 74. Análisis Resultados Resistencia a compresión cilindros de concreto con ceniza de madera***

| CONCRETO ESTRUCTURAL CON CENIZA DE MADERA (20%) COMO SUSTITUTO PARCIAL DEL AGREGADO FINO) | | | |
|---|---|---|---|
| **Edad** | **Resistencia (Mpa)** | **% Resistencia desarrollada respecto a f'c** | **% Resistencia desarrollada respecto a f'cr** |
| 7 | 16,82 | 80,11 | 57,42 |
| 14 | 22,45 | 106,92 | 76,64 |
| 28 | 24,10 | 114,78 | 82,27 |

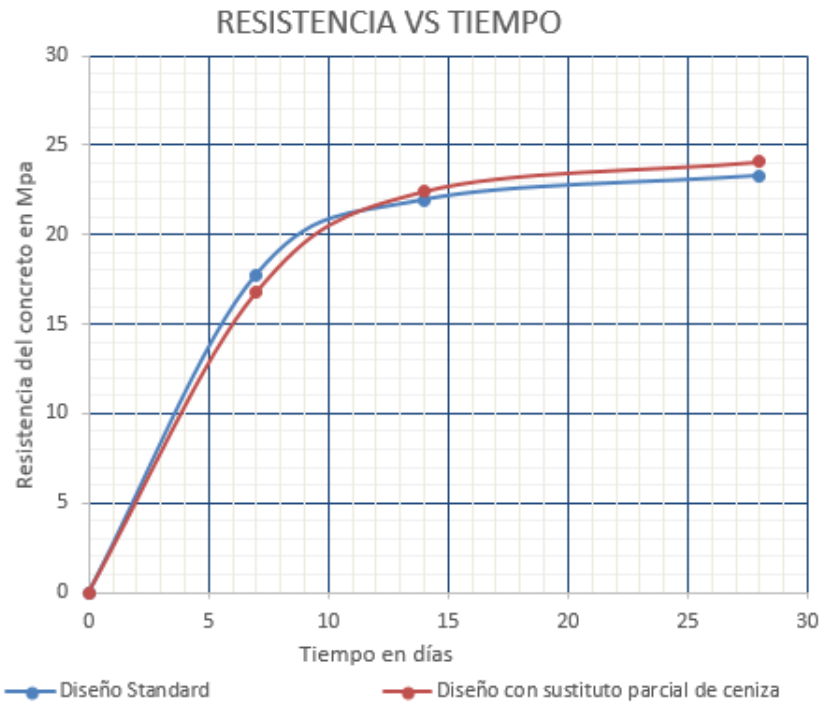
***Fuente: Elaboración Propia***

### 16.2.2 DESARROLLO DE LA RESISTENCIA VS TIEMPO

#### 16.2.2.1 ¿Qué arreglo experimental alcanzó mayor resistencia a la compresión a la edad de 28 días?

En el gráfico 11 se puede observar el desarrollo de resistencia vs tiempo para los dos arreglos experimentales de concreto estructural estándar y con sustitución de ceniza de madera es la siguiente:

***Gráfico 11.*** ***Análisis de la resistencia obtenida respecto al tiempo para los arreglos experimentales***




***Fuente: Elaboración Propia***

Del gráfico 11 se puede concluir que, aunque los dos arreglos experimentales alcanzaron la resistencia deseada de 21 Mpa, estos no cumplen con la resistencia requerida de 29.3 Mpa definida en el diseño de mezcla y contemplada en la NSR 10. Siendo su valor máximo de 24.01 Mpa para el arreglo con sustitución de ceniza de madera (siendo el arreglo con mayor resistencia adquirida) mientras que el arreglo estándar tuvo un valor de resistencia de 23,29 Mpa para esta especificación. Mientras que se puede destacar que en su mayoría las probetas falladas alcanzaron los valores correspondientes a concreto estructural de modo que se puede considerar en la fabricación de elementos que requieren las edificaciones.

#### 16.2.2.2 ¿Cumple el arreglo experimental (sustitución de ceniza 20%) con las especificaciones requeridas para concreto estructural?

Otro aspecto por valorar es el hecho de que la sustitución de un 20 % de ceniza de madera al agregado fino haya alcanzado satisfactoriamente las especificaciones que exige la norma teniendo en cuenta su comportamiento representado por las propiedades del concreto en estado fresco (consistencia, trabajabilidad y homogeneidad) y en estado endurecido (resistencia a la compresión).

Por lo que se concluye que el arreglo experimental con sustitución de ceniza (20%) al agregado fino cumple las expectativas requeridas basándose en que al momento de realizar el ensayo de asentamiento presentó una consistencia plástica, uniforme en sus componentes, fácil de colocar y sobre todo resistente al esfuerzo al que fueron expuestas las probetas cilíndricas que se realizaron para este trabajo de grado.

#### 16.2.2.3 ¿Por qué los arreglos experimentales no alcanzaron la resistencia requerida F’c req de 29,3 Mpa?

Son diversos los factores que pueden influir en la resistencia del concreto, entre los cuales están: El contenido de cemento, la relación agua-cemento, contenido de aire incluido, las características de los agregados, el tamaño máximo del agregado grueso, el proceso de fraguado y curado, la edad y la temperatura.

Para los dos arreglos experimentales se utilizó una granulometría continua, es decir que los tamaños de las partículas se presentan de manera gradual permitiendo una compacidad

aceptable, pero se evidenció la presencia de material reciclado entre los cuales estaban partículas de concreto y ladrillo. Esas partículas restantes del proceso de tamizado pudieron afectar en primer lugar la absorción del material granular y posteriormente la resistencia a la abrasión y compresión final.

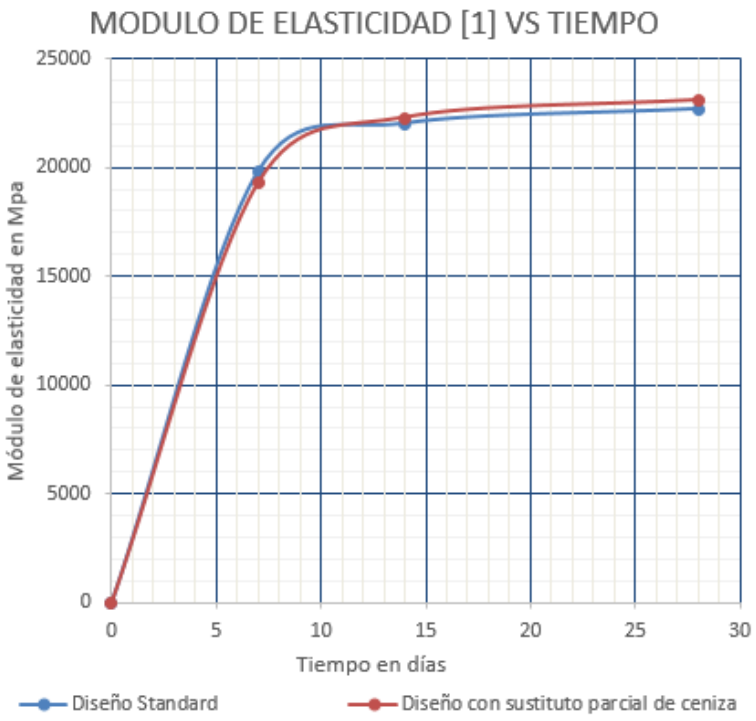
En cuanto a la caracterización de la ceniza que se utilizó como sustituto parcial del agregado fino, se evidenció la presencia del elemento potasio (K) en un 12,49% de la muestra sometida al ensayo de fluorescencia de rayos x, este elemento es perjudicial en el desarrollo de la resistencia ya que genera un aumento del volumen de la pasta del concreto, ocasionando presiones internas que finalizan con el fisuramiento del material o en menor medida el desprendimiento del material.

En la etapa de curado la posible pérdida de humedad en la superficie del concreto pudo ocasionar menor hidratación y pérdida de resistencia ya que altera la relación agua-cemento.

En conclusión, estos factores influyen directamente en la resistencia del concreto, incluso una adecuada colocación en el proceso de elaboración de las probetas cilíndricas es importante a la hora de estimar las propiedades de resistencia en una mezcla de concreto.

### 16.2.3 ANÁLISIS DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD

*Gráfico 12.* ***Análisis del módulo de elasticidad I obtenida respecto al tiempo para los arreglos experimentales***




***Fuente: Elaboración Propia***

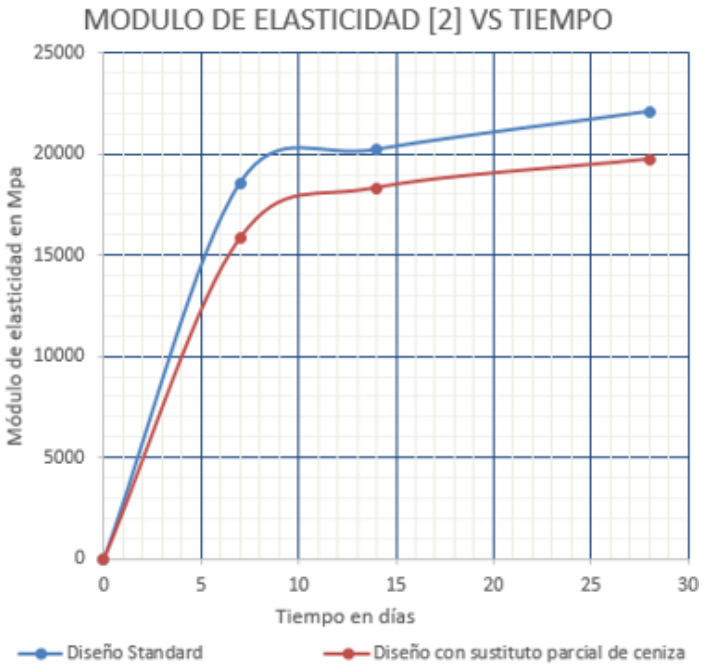
De la gráfico 12 se puede evidenciar que tanto para el arreglo estándar como para el arreglo con ceniza de madera como sustituto parcial del agregado fino el valor y comportamiento del módulo de elasticidad es similar presentando valores mayores a los 28 días acorde a la máxima resistencia alcanzada a esa edad en comparación con edades tempranas y teniendo en cuenta la constante que nos proporciona el titulo C.8.5.1 de la NSR 10 para el cálculo del módulo de elasticidad sin tener presente la densidad del concreto.

*Tabla 75.* ***Análisis del módulo de elasticidad respecto al tiempo en distintas edades para arreglo con ceniza de madera***

| Día de falla | Probeta N° | Volumen (cm3) | Peso (g) | Densidad (kg/m3) | σ en Mpa | E [1] | E[2] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 7 | 1 | 5390,27 | 11802 | 2189,50 | 17,77 | 19814,93 | 18572,95 |
| 14 | 2 | 5461,9 | 11792,67 | 2159,08 | 21,94 | 22014,78 | 20206,34 |
| 28 | 3 | 5444,05 | 12226,70 | 2245,88 | 23,29 | 22680,21 | 22085,05 |

*Fuente: Elaboración Propia*

*Gráfico 13.* ***Análisis del módulo de elasticidad II obtenida respecto al tiempo para los arreglos experimentales***




*Fuente: Elaboración Propia*

Del gráfico 13 se puede evidenciar que para el arreglo estándar los valores del módulo de elasticidad son mayores que los que representa el arreglo con ceniza de madera como sustituto parcial del agregado fino, presentando valores mayores a los 28 días acorde a la máxima resistencia alcanzada a esa edad en comparación con edades tempranas y teniendo en cuenta la densidad del concreto que nos proporciona la ecuación para dicho calculo en el titulo C.8.5.1 de la NSR 10.

# 17 CONCLUSIONES

Luego de realizar un análisis a los resultados obtenidos en la elaboración y desarrollo de concreto estructural con ceniza de madera como sustituto parcial del agregado fino se puede concluir que:

- El material granular utilizado para el diseño de mezcla cumple con las especificaciones que exige la normativa NTC 174 para el caso del agregado grueso, mientras que la gradación del agregado fino necesitó de una optimización (mínimos cuadrados) para adecuar las franjas granulométricas según la teoría de Fuller-Thompson.

- En cuanto a la absorción del agregado grueso esta fue de 8% muy por encima del rango adecuado para la grava (0,2% - 4%), esto debido a la presencia de material reciclado que por sus características atrapó más cantidad de agua en los poros del material y que afectaría el agua de mezclado sino se realizara la corrección por humedad para el diseño de mezcla.

- La caracterización de la ceniza de madera que se utilizó como sustituto parcial del agregado fino por medio del ensayo fluorescencia de rayos x, dio a conocer el porcentaje destacado de elementos como Silicio (18,36%) y Calcio (26,57%) típicos de una ceniza, aunque la presencia de Potasio (12,49%), puede que haya influido de manera adversa en la resistencia final y en el tipo de falla, luego de que el ensayo de compresión reflejara desprendimientos en la parte lateral superior de una probeta.

- El asentamiento registrado para los dos arreglos experimentales no tuvo mayor inconveniente, estando estos valores dentro del rango establecido de acuerdo con su trabajabilidad para el elemento estructural diseñado, presentando una consistencia y homogeneidad adecuada que evitaría la segregación de los componentes del concreto y refleja una compacidad óptima para el desarrollo de la resistencia deseada.

- No hubo presencia de material impuro a gran escala en el agregado fino según el ensayo de contenido de materia orgánica realizado al material aplicando hidróxido de sodio y comparando visualmente la escala de colores de Garnerd, arrojando un color por debajo del color de referencia, por lo cual se descarta cualquier afectación en el desarrollo de la resistencia del concreto elaborado por este aspecto.

- El comportamiento del material granular con respecto a los ensayos de desgaste y abrasión fueron aceptables para el ensayo de máquina de los ángeles, cumpliendo con los requerimientos que exige la normatividad I.N.V.E-218-13 con un porcentaje de desgaste del 39%, pero en cuanto a condiciones de inmersión del material como se presenta en el ensayo de micro deval, su desempeño fue inferior a lo esperado ya que sus partículas se pulverizaron en mayor parte alcanzando un porcentaje de desgaste superior al 20%

- El arreglo experimental que tuvo la mayor resistencia a la compresión fue el realizado con la sustitución de ceniza de madera con un 3,89 % por encima del arreglo estándar. Esto se determinó comparando los valores obtenidos del ensayo de la resistencia a la compresión

de las probetas N° 3 y N° 6 las cuales corresponden a una edad de 28 días con un valor de 23,29 Mpa y 24,10 Mpa respectivamente.

La presencia de Silicio y Calcio adicional en el arreglo con ceniza de madera evidencia la reacción de los hidróxidos alcalinos con la pasta de cemento generando así un gel que absorbe el agua produciendo presiones internas en el concreto que brindan mayor compacidad por lo tanto mayor resistencia, además el Calcio actúa como regulador del proceso de fraguado, es decir permite una óptima hidratación del cemento.

- La composición química elemental indica que la calidad de la ceniza de madera es menor respecto a otros materiales utilizados pero que ya se debe profundizar el porcentaje utilizado para una sustitución en otras investigaciones y recalcar que estas sustituciones se realizaron en el cemento y no en el agregado fino por lo cual las interacciones que se generaron en la elaboración de concreto son muy diferentes

- El ensayo de resistencia a la compresión realizado al arreglo experimental con ceniza de madera permitió establecer que el porcentaje del 20% utilizado en el diseño de mezcla para la sustitución del agregado fino fue aceptable, ya que de acuerdo a investigaciones por organismos internacionales el contenido de Silicio presente para esta distribución porcentual reacciona adecuadamente con el hidróxido de Calcio durante el proceso de fraguado, lo cual ayuda a obtener una mayor resistencia durante edades posteriores. En cambio, un porcentaje superior al 20% en la sustitución de ceniza afecta la contracción del cemento y provoca agrietamientos en el concreto elaborado.

- En cuanto a la densidad obtenida, esta corresponde con los valores adecuados para un concreto estructural de peso normal con 2.246 kg/m³ para arreglo estándar y 2.060 kg/m³ para el arreglo con ceniza, este último por debajo por tener menos masa que el arreglo sin sustitución como se evidencia en las tablas 69 y 70 pero cumple con las especificaciones si se compara con un concreto liviano además su comportamiento se justifica por la presencia de un componente sustituyente.

- El módulo de elasticidad del concreto para los arreglos experimentales tuvo el mayor valor a los 28 días de edad como corresponde en el desarrollo de sus capacidades y se encuentra en el rango normal de un concreto de peso normal con 22.000 Mpa y 23.000 Mpa para los dos arreglos desarrollados en este trabajo.

- Los resultados obtenidos en el desarrollo de este trabajo de grado permiten establecer que la utilización de la ceniza de madera como material sustituyente en la elaboración de concreto o como materia prima en la industria de la construcción puede contribuir notablemente en la mitigación del impacto ambiental producto de la explotación de los minerales en las canteras y que afectan el medio abiótico en este caso el suelo, sin mencionar la problemática administrativa con el ejercicio de la minería ilegal.

- No es posible realizar un análisis estadístico de las muestras de concreto debido a las pocas probetas elaboradas, ya que la norma sismo resistente NSR-10, titulo C 5.3.2.2 y la NTC 2275 Procedimiento recomendado para la evaluación de resultados de ensayos de

resistencia del concreto establecen que para un análisis estadístico deben ser elaborados por lo menos 2 especímenes para cada arreglo experimental.

# 18 RECOMENDACIONES

Una vez finalizada la presente investigación se realizan las siguientes recomendaciones, en aras de contribuir con el desarrollo de nuevos proyectos los cuales estarán encaminados con la fabricación de concreto estructural con ceniza de madera como sustituto parcial del agregado fino.

- Un aspecto por mejorar es el de implementar distintos porcentajes de ceniza de madera para analizar el comportamiento de cada arreglo experimental y evidenciar la implicación del contenido de Silicio y Calcio en las propiedades en estado fresco y endurecido del concreto.

- Establecer un mayor número de probetas cilíndricas para los distintos arreglos experimentales que permita realizar un análisis estadístico detallado de acuerdo con la normatividad para el control de calidad del concreto estructural.

- Realizar una comparación entre la sustitución con ceniza de madera al agregado fino y una sustitución de ceniza de madera al contenido de cemento para analizar su desempeño y establecer nuevas variables de respuesta en la búsqueda de nuevas alternativas de construcción sostenible.

- Investigar el desempeño del concreto estructural con ceniza de madera como sustituto parcial del agregado fino en procesos de exposición a los sulfatos para evidenciar la

reacción del hidróxido de calcio con los diferentes compuestos como sulfato de sodio, potasio y magnesio, así como los procesos de carbonatación del acero de refuerzo para medir su durabilidad.

- Investigar el desempeño del concreto estructural fabricado con ceniza de madera como sustituto del agregado fino en elementos no estructurales, para identificar el rendimiento y comportamiento como aislante térmico, aislante acústico y su resistencia contra el fuego, diseñando un concreto con un tipo de ceniza madera que permita tener baja densidad y que permita reducir la carga muerta adicionalmente.

- Establecer nuevos procedimientos para lo obtención de la ceniza de madera como por ejemplo la combustión en un horno artesanal a temperaturas las cuales permitan eliminar el 100% de impurezas y lograr una materia prima libre de elementos que puedan influir en el desarrollo del concreto estructural independientemente del porcentaje de sustitución que se requiera.

# 19 BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. A.C.I. Committee 211: Recommended Practice for Selecting Proportions for Normal Weight Concrete. A.C.I 211.1 – 70. Detroit. Mich., 1983.

ARANGO, Jesús H: Método Práctico para dosificar mezclas de concreto, Instituto Colombiano de Productores de Cemento, ICPC, Notas Técnicas N°12.

ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA. Norma Sismorresistente de 2010. Bogotá D.C. 2012.

CONTRATO ICEL-UNIVALLE 5854, Informe de avance técnico del estudio: "Utilización y/o disposición de residuos de la combustión del carbón en las centrales térmicas de: Paipa, Zipaquirá, Guajira y Tasajero". Informe de avance, Santiago de Cali marzo 31 de 1993, p 55.

CORREA, Diego F.; PEREZ, Carlos D.: Requerimiento de agua de mezclado para concretos de peso normal, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, 1990.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Agregados Livianos Para Concreto Estructural. NTC – 4045. Primera actualización. Bogotá D.C. 1997. 3 p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto. NTC – 673. Tercera actualización. Bogotá D.C. 2010. 2 p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Especificaciones de los agregados para concreto. NTC – 174. Quinta actualización. Bogotá D.C. 2000. 5 p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA. Procedimiento recomendado para la evaluación de los resultados de los ensayos de resistencia del concreto. NTC – 2275. Primera actualización. Bogotá D.C. 1997. 15 p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto. NTC – 396. Primera actualización. Bogotá D.C. 1992. 6 p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Método de ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado grueso. NTC – 176. Primera actualización. Bogotá D.C. 1995. 3 p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos. NTC – 77. Segunda actualización. Bogotá D.C. 2006. 2 p.

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Contenido de materia orgánica en arenas usadas en la preparación de morteros o concretos. I.N.V.E- 212-13. Bogotá D.C. 2p.

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Determinación de la resistencia del agregado grueso al desgaste por abrasión utilizando el aparato Micro Deval. I.N.V.E-238-13. Bogotá D.C.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Índice de alargamiento y aplanamiento de los agregados para carreteras. I.N.V.E-230-13. Primera actualización. Bogotá D.C. 2012. E 230 - 2 p.

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Resistencia a la degradación de los agregados menores a 37 mm por medio de la máquina de los ángeles. I.N.V.E-218-13. Bogotá D.C.

KOSMATKA SH, KERKHOFF B, PANARESE WC, TANESI J. Agregados para concreto. Diseño y control de mezclas de concreto. Primera ed. Illinois: Portland Cement Association; 2004. p 118.

MENA, Milton: Guía Técnica. Diseño de mezclas de concreto simple hidráulico de peso normal. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

MINDNESS, S; YOUNG, J.F.; Concrete, Prentice-Hall, Inc., Englewood Ciffs, New Jersey, 1981.

NEVILLE, Adam M: Tecnología del concreto, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A. C México, 1979.

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, (FAO) Estudio: Conservación de energía en las industrias mecánicas forestales, 1991.

PEÑA URUEÑA, Mary L, Caracterización de cenizas de algunos carbones colombianos in situ por retro dispersión gamma- gamma, Tesis de grado, Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Química, 2011, 125 p

PORRERO, J.; RAMOS, C.; GRASSES, J.; Manual de concreto fresco, Asociación Venezolana de Sistemas de Paredes Estructurales, Caracas, 1979.

REY, Carlos R, Granulometrías óptimas para concreto de peso normal, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, 1987.

SÁNCHEZ de GUZMÁN, Diego. Tecnología del Concreto y del Mortero. 5 ed. Bogotá D.C. Bhandar editores LTDA. 2001.

URREGO, Juan David. AYALA, Ismael. Fabricación de concreto liviano de 21 Mpa a partir de roca pómez extraída de Flandes – Tolima. Bogotá, Colombia. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. 2019.