

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**VALORACIÓN DE RCD Y CENIZAS VOLANTES DE BIOMASA DE
LINARES EN MORTEROS BASE CEMENTO. ESTUDIO DEL
TRATAMIENTO Y VALORIZACIÓN DE LA E.D.A.R. DE
VILLAVICIOSA**

TUTORES ACADÉMICOS: Prof. José Ramón Jiménez Romero

Prof. José María Fernández Rodríguez

Prof. Manuel Cruz-Yusta

Presentado en la ilustre
Escuela Politécnica Superior de Belmez,
Universidad de Córdoba, España

Por el Br.:

Virel Rivero, Redescar José

Para optar al Título de

Ingeniero Civil

en la ilustre

Universidad Central de Venezuela

Belmez, 2014

Año Académico 2013/14
Convocatoria 1
Versión 1
Centro 110 Escuela Politécnica Superior de Belmez
Plan 278 Grado de Ingeniería Civil
Tipo Estudios 5 Grado
Estudios 109 Grado de Ingeniería Civil
Asignatura 101170 TRABAJO FIN DE GRADO
Tipo Asignatura 19 Trabajo fin de grado
Título Asignatura "Valoración de RCD y canizas volantes de Línres en morteros base cemento. Estudio del tratamiento y valorización de aguas residuales de la E.D.A.R. de Villavieiosa"

N.I.A	DNI	Apellidos y Nombre	Calificación Numérica	Calificación Cualitativa
20052425	031850564	Virel Rivero, Redescar José	9,2	SOBRESALIENTE

DOCENTES RESPONSABLES	CENTRO/DEPARTAMENTO	CARGO	FIRMAS
Pastoriza Muñoz, Javier	Ingeniería Gráfica y Geomática	PRESIDENTE	
Lopez Pineda, German	Mecánica	VOGAL	
García Morillo, Jorge	Agronomía	SECRETARIO/A	
Fernández Rodríguez, José María	Química Inorgánica e Ingeniería Química	SUPLENTE	
Zurera Díaz, Javier	Ingeniería Rural	SUPLENTE	

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar agradezco a mis profesores y también directores de proyecto José Ramón Jiménez y José María Fernández Rodríguez, por haber aceptado que trabajara en esta línea de investigación, y así permitir que desarrollara esta importante etapa dentro de mi crecimiento académico y personal.

Debo agradecer de manera especial a Enrique “Kike” Fernández Ledesma, por sus consejos y sugerencias a lo largo del desarrollo de la investigación; y también debo reconocer el apoyo notable y acompañamiento en todo momento de Anabel Torres, quién siempre estuvo allí en todo momento ayudando, apoyando y supervisando todo el trabajo práctico, gracias por tu paciencia.

A mi familia, porque a pesar de la distancia siempre estuvieron allí motivándome en todo momento para concluir mi trabajo de la mejor manera posible.

Y para finalizar, de manera muy especial, a mi compañera Rossana Gosende, por su acompañamiento, colaboración, sugerencias y todo el apoyo demostrado en todas las fases de esta investigación, para llevarlo hacia adelante y demostrar lo capaces que somos como venezolanos y como estudiantes de la Universidad Central de Venezuela, de la que estoy seguro ambos nos sentimos orgullosos, y a la que debemos nuestra formación académica e incluso parte de nuestra formación personal.

Virel R., Redescar J.

**VALORACIÓN DE RCD Y CENIZAS VOLANTES DE BIOMASA DE LINARES
EN MORTEROS BASE CEMENTO. ESTUDIO DEL TRATAMIENTO Y
VALORIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DE LA E.D.A.R. DE VILLAVICIOSA**

Tutores Académicos: Prof. José Ramón Jiménez Romero.

Prof. José María Fernández Rodríguez

Prof. Manuel Cruz-Yusta

Proyecto Fin de Carrera. Córdoba, España. Universidad de Córdoba

Escuela Politécnica Superior de Belmez. 2014, 159 pág.

Palabras Clave: morteros; cenizas volantes; biomasa; árido reciclado; agua residual; flexión; compresión; retracción; permeabilidad; adherencia.

RESUMEN

En la actualidad, una línea de investigación interesante en la industria de la construcción, es la referente al estudio de materiales alternativos. Por ello, se han preparado mezclas de morteros utilizando cenizas volantes de biomasa, residuos de construcción y demolición y agua residual tratada como sustitutos de los componentes convencionales de las mezclas de morteros para evaluar sus propiedades en estado endurecido. En primer lugar, se realizó una caracterización del agua residual de acuerdo a los parámetros normativos de agua de amasada de la EHE-08, así como la descripción del esquema de funcionamiento de la E.D.A.R. de Villaviciosa. Por otra parte, mezclas de mortero con agua potable y agua residual tratada fueron elaboradas partiendo de una dosificación en volumen cemento/arena 1:6, y variando luego el porcentaje de cemento en un 80%, 90% y 100% de esta dosificación, así como su tipología. Además, bajo una dosificación en volumen cemento/árido/filler 1:6:0,5 se elaboraron probetas de referencia usando arena natural y filler silíceo, los cuales luego fueron sustituidos por árido reciclado y cenizas volantes de biomasa, respectivamente. Se ejecutaron ensayos de resistencia a flexión y compresión, retracción, adherencia y permeabilidad. Los resultados indican una aptitud del agua residual

para ser utilizadas en las amasadas de mezclas de morteros; en el apartado mecánico, las resistencias a flexión y compresión a los 28 días de las probetas con cenizas fueron superiores respecto a las mezclas con filler, en las que incorporan árido reciclado, mientras que en las de arena natural se apreció una tendencia contraria. En las probetas elaboradas con agua residual, se obtuvieron valores ligeramente más bajos respecto a las de agua potable, hecho más notorio en aquellas elaboradas con cemento CEM II, debido a una resistencia esperada más baja. Se obtuvo una mayor retracción, pérdida de peso y permeabilidad en las probetas con árido reciclado, siendo mayor en aquellas que incorporan cenizas volantes. Esto es indicativo de una estructura interna más porosa.

ÍNDICE GENERAL

LISTA DE TABLAS	1
LISTA DE FIGURAS	5
1. INTRODUCCIÓN.....	9
2. OBJETIVOS.....	13
2.1. Objetivo General.....	13
2.2. Objetivos Específicos	13
3. ANTECEDENTES	14
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	22
4.1. Materiales.....	22
4.1.1. Árido Natural.....	22
4.1.1.1. Descripción.....	22
4.1.1.2. Trabajos Preliminares.....	22
4.1.2. Desechos de Construcción y Demolición (R.C.D.).....	24
4.1.2.1. Descripción.....	24
4.1.2.2. Trabajos Preliminares.....	25
4.1.3. Cemento	26
4.1.3.1. Descripción.....	26
4.1.4. Agua de amasado	29
4.1.5. Aditivo.....	30
4.1.6. Cenizas Volantes de Biomasa	31
4.2. Métodos	32
4.2.1. Caracterización de la Estación Depuradora de Aguas Residuales (E.D.A.R.) del poblado de Villaviciosa de Córdoba	32
4.2.1.1. Características Generales del Sistema	32

4.2.1.2. Aliviadero (By-Pass de cabecera)	35
4.2.1.3. Pretratamiento.....	35
4.2.1.4. Aliviadero (By-Pass del reactor biológico)	36
4.2.1.5. Reactor Biológico con biodiscos	36
4.2.1.6. Decantador secundario	41
4.2.1.7. Espesador de fangos	43
4.2.1.8. Deshidratación de lodos y almacenamiento	44
4.2.1.9. Unidad de Supervisión y Control	46
4.2.2. Factores de Riesgo	47
4.2.3. Normativa.....	48
4.2.4. Equipos.....	49
4.2.4.1. Descripción de los equipos de ensayo	49
4.2.4.1.1. Mesa de Sacudidas.....	50
4.2.4.2. Descripción de la maquinaria auxiliar	53
4.2.4.2.1. Estufa	53
4.2.4.2.2. Amasadora	54
4.2.4.2.3. Mesa Compactadora	56
4.2.5. Proceso de Fabricación de los morteros.....	56
4.2.5.1. Método de Amasado.....	56
4.2.5.2. Determinación de la consistencia del mortero fresco.....	57
4.2.5.3. Fabricación del mortero endurecido.....	59
4.2.6. Diseño Experimental	61
4.2.6.1. Sustitución de filler silíceo por cenizas volantes de biomasa.....	61
4.2.6.2. Sustitución de agua de amasado potable por agua residual tratada.....	62

4.2.7. Metodología de Ensayo	65
4.2.7.1. Ensayos realizados al agua residual tratada.....	65
4.2.7.1.1. Determinación del pH.....	65
4.2.7.1.2. Determinación del contenido de cloruros	68
4.2.7.1.3. Determinación del contenido de sustancias disueltas.	71
4.2.7.1.4. Determinación del contenido de sulfatos.....	74
4.2.7.2. Ensayos realizados a los áridos	80
4.2.7.2.1. Granulometría	80
4.2.7.2.2. Densidad y absorción de agua	82
4.2.7.3. Ensayos realizados a los morteros endurecidos.....	84
4.2.7.3.1. Ensayo de resistencia a flexión y a compresión.....	84
4.2.7.3.2. Ensayo de Retracción.....	85
4.2.7.3.3. Ensayo de determinación del coeficiente de permeabilidad al vapor de agua.....	88
4.2.7.3.4. Ensayo de determinación de la resistencia a la adhesión.....	91
5. RESULTADOS Y DISCUSIONES	93
5.1. Parámetros de calidad del agua de amasado	93
5.1.1. Determinación del pH	93
5.1.2. Determinación del contenido de cloruros.....	94
5.1.3. Determinación del contenido de sustancias disueltas	95
5.1.4. Determinación del contenido de sulfatos	96
5.2. Caracterización del árido natural	97
5.2.1. Granulometría.....	97
5.2.2. Densidad y Absorción.....	98
5.3. Caracterización del árido reciclado.....	98

5.3.1. Granulometría.....	98
5.3.2. Densidad y Absorción del árido reciclado	99
5.4. Resistencia a Flexión del Mortero Endurecido.....	102
5.4.1. Efecto de las Cenizas volantes de biomasa en la resistencia a flexión del mortero endurecido	102
5.4.1.1. Probetas con arena natural.....	102
5.4.1.2. Probetas con R.C.D.	103
5.4.2. Efecto de la incorporación del agua residual en las mezclas de amasado.....	105
5.4.2.1. Probetas elaboradas con Cemento CEM I 52.5 R	105
5.4.2.2. Probetas elaboradas con Cemento CEM II/B-L 32.5N	107
5.5. Resistencia a Compresión del mortero endurecido.....	109
5.5.1. Efecto de las cenizas volantes de biomasa en la resistencia compresión del mortero endurecido	109
5.5.1.1. Probetas con arena natural.....	109
5.5.1.2. Probetas con R.C.D.	111
5.5.2. Efecto de la incorporación del agua residual en las mezclas de amasado.....	112
5.5.2.1. Probetas elaboradas con Cemento CEM I 52.5 R	112
5.5.2.2. Probetas elaboradas con Cemento CEM II/B-L 32.5N	114
5.6. Retracción del Mortero Endurecido.....	116
5.6.1. Efecto de la sustitución de cenizas volantes de biomasa en la retracción del mortero endurecido	116
5.6.1.1. Probetas elaboradas con arena natural como árido de la amasada	116
5.6.1.2. Probetas elaboradas con R.C.D. como árido de la amasada.....	121
5.7. Permeabilidad del Mortero endurecido.....	127
5.7.1. Efecto de las cenizas volantes de biomasa en la permeabilidad del mortero endurecido	127

5.7.1.1. Probetas elaboradas con arena natural.....	127
5.7.1.2. Probetas elaboradas con R.C.D.	130
5.8. Adherencia del mortero endurecido.....	133
6. CONCLUSIONES.....	135
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	137
10. ANEXOS.....	139

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Especificaciones técnicas del Cemento CEM I 52.5 R	27
Tabla 2: Especificaciones técnicas del Cemento CEM II/B-L 32.5 N	28
Tabla 3: Datos Generales de partida en el diseño.....	33
Tabla 4: Parámetros de diseño del reactor biológico.....	41
Tabla 5: Características fundamentales del decantador secundario	41
Tabla 6: Características operativas de las bombas de impulsión.....	43
Tabla 7: Dimensiones del espesador de fangos	44
Tabla 8: Parámetros significativos del proceso de deshidratación	44
Tabla 9: Factores de riesgo que pueden afectar el método de trabajo	48
Tabla 10: Rampa de calcinación.....	79
Tabla 11: Valores admisibles de parámetros químicos para el agua de amasado	93
Tabla 12: Valores de pH de la muestra de agua residual.....	94
Tabla 13: Concentraciones del ión cloruro en las muestras de agua residual	95
Tabla 14: Sustancias disueltas contenidas en las muestras de agua residual.....	95
Tabla 15: Contenido de sulfatos de las muestras de agua residual.....	96
Tabla 16: Resultados de densidad y absorción de la arena natural	98
Tabla 17: Primera repetición del ensayo de absorción y densidad del R.C.D.....	100
Tabla 18: Segunda repetición del ensayo de absorción y densidad del R.C.D.....	101
Tabla 19: Resumen estadístico de los datos presentados en la figura	103
Tabla 20: Resumen estadístico de los datos presentados en la figura	104
Tabla 21: Resistencias a flexión obtenidas para probetas elaboradas con agua potable y cemento CEM I 52.5 R.....	105
Tabla 22: Resistencias a flexión obtenidas para probetas elaboradas con agua residual y cemento CEM I 52.5 R.....	106

Tabla 23: Resistencias a flexión obtenidas para probetas elaboradas con agua potable y cemento CEM II/B-L 32.5N	107
Tabla 24: Resistencias a flexión obtenidas para probetas elaboradas con agua residual y cemento CEM II/B-L 32.5N	108
Tabla 25: Resumen estadístico de los datos presentados en la figura	110
Tabla 26: Resumen estadístico de los datos presentados en la figura	112
Tabla 27: Resistencias a compresión obtenidas para probetas elaboradas con agua potable y cemento CEM I 52.5 R	113
Tabla 28: Resistencias a compresión obtenidas para probetas elaboradas con agua residual y cemento CEM I 52.5 R	113
Tabla 29: Resistencias a compresión obtenidas para probetas elaboradas con agua potable y cemento CEM II/B-L 32.5 N	115
Tabla 30: Resistencias a compresión obtenidas para probetas elaboradas con agua residual y cemento CEM II/B-L 32.5 N	115
Tabla 31: Medición de longitud de las probetas de los morteros AN SF	117
Tabla 32: Retracción media y desviación estándar de las probetas de los morteros AN SF	117
Tabla 33: Medición de longitud de las probetas de los morteros AN CBL	118
Tabla 34: Retracción media y desviación estándar de las probetas de los morteros AN CBL	118
Tabla 36: Variación de la masa de las probetas tipo AN CBL a diferentes edades de ensayo	120
Tabla 37: Medición de longitud de las probetas de los morteros AN SF	122
Tabla 38: Retracción media y desviación estándar de las probetas de los morteros AR SF	122
Tabla 39: Medición de longitud de las probetas de los morteros AR CBL	123
Tabla 40: Retracción media y desviación estándar de las probetas de los morteros AR CBL	123

Tabla 41: Variación de la masa de las probetas tipo AR SF a diferentes edades de ensayo	125
Tabla 42: Variación de la masa de las probetas tipo AR CBL a diferentes edades de ensayo	125
Tabla 43: Permeabilidad de la probeta AN SF 1-1.....	127
Tabla 44: Permeabilidad de la probeta AN SF 1-2.....	127
Tabla 45: Permeabilidad de la probeta AN SF 1-3.....	128
Tabla 46: Valor medio de permeabilidad de las probetas AN SF	128
Tabla 47: Permeabilidad de la probeta AN CBL 1-1	128
Tabla 48: Permeabilidad de la probeta AN CBL 1-2	129
Tabla 49: Permeabilidad de la probeta AN CBL 1-3	129
Tabla 50: Permeabilidad media de las probetas AN CBL.....	129
Tabla 51: Permeabilidad de la probeta AR SF 1-1	130
Tabla 52: Permeabilidad de la probeta AR SF 1-2.....	130
Tabla 53: Permeabilidad de la probeta AR SF 1-3	131
Tabla 54: Valor medio de permeabilidad de las probetas AR SF	131
Tabla 55: Permeabilidad de la probeta AR CBL 1-1.....	131
Tabla 56: Permeabilidad de la probeta AR CBL 1-2.....	132
Tabla 57: Permeabilidad de la probeta AR CBL 1-3.....	132
Tabla 58: Valor medio de la permeabilidad AR CBL.....	132
Tabla 59: Adherencia de las probetas AN-SF	133
Tabla 60: Adherencia de las probetas AN-CBL.....	133
Tabla 61: Adherencia de las probetas AR-SF	134
Tabla 62: Adherencia de las probetas AR-CBL.....	134
Tabla 63: Resistencias a Flexión y Compresión de las probetas con cenizas volantes y filler síliceo a los 28 días.....	145

Tabla 65: Resistencias a Flexión y Compresión de las probetas con agua potable y cemento CEM II/B-L32.5 N	150
Tabla 66: Resistencias a Flexión y Compresión de las probetas con agua potable y cemento CEM I 52.5 R	152
Tabla 67: Resistencias a Flexión y Compresión de las probetas con agua residual y cemento CEM I 52.5 R	153
Tabla 68: Resistencias a Flexión y Compresión de las probetas con agua residual y cemento CEM II/B-L 32.5 N	154
Tabla 69: Dosificaciones de las amasadas que evalúan la influencia de cenizas volantes de biomasa.....	156
Tabla 70: Dosificaciones de las amasadas que evalúan la influencia del agua residual	158

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Aspecto de la arena en estado natural	22
Figura 2: Tamiz de 4mm referencial	23
Figura 3: Operación de cuarteo	24
Figura 4: Aspecto original del R.C.D.	25
Figura 5: Condiciones de acopio de los materiales en bolsas plásticas.....	26
Figura 6: Saco de Cemento CEM II/B-L 32.5 N.....	29
Figura 7: Aditivo Plastificante Neoplast	30
Figura 8: Aspecto de las cenizas volantes de biomasa del complejo situado en Linares	31
Figura 9: Vista General de la Planta.....	32
Figura 10: Tubería de ingreso del agua cruda a la arqueta de entrada	35
Figura 11: Unidad de pretratamiento.....	36
Figura 12: Biodiscos rotatorios de la E.D.A.R.	38
Figura 14: Canaleta perimetral de recogida, junto al decantador secundario.....	43
Figura 15: Equipo utilizado para el secado de los fangos	46
Figura 16: Unidad espesadora de fangos en primer plano junto a tolva de almacenamiento de fangos deshidratados.....	46
Figura 17: Vista de un tablero de control de la E.D.A.R.....	47
Figura 18: Mesa de Sacudidas	50
Figura 19: Molde Troncocónico	51
Figura 20: Pisón utilizado en la prueba de consistencia.....	52
Figura 21: Regla utilizada para medir el escurrimiento del mortero.....	53
Figura 22: Enrasador utilizado en el ensayo de consistencia	53
Figura 23: Estufa utilizada para el secado de los materiales	54
Figura 24: Amasadora	55

Figura 25: Mesa Compactadora.....	56
Figura 26: Medición de la consistencia del mortero.....	59
Figura 27: Probetas de mortero enrasadas.....	60
Figura 28: Martillo utilizado para el desmolde de las probetas.....	61
Figura 29: pH-metro con el correspondiente electrodo.....	66
Figura 30: Disoluciones Tampón comerciales usadas en la fase de calibración.....	67
Figura 31: Preparación de las muestras de ensayo.....	69
Figura 32: Cromato Potásico.....	69
Figura 33: Adición de la disolución de nitrato de plata.....	70
Figura 34: Recipientes pesados en la balanza de cuatro decimales de precisión.....	72
Figura 35: Baño de arena.....	73
Figura 36: Detalle de los sólidos disueltos depositados en el fondo del recipiente.....	73
Figura 37: Aspecto de la muestra de agua tras la primera adición de gotas de naranja de metilo.....	75
Figura 38: Aspecto de la muestra una vez que el pH es más ácido.....	76
Figura 39: Matraz con embudo y conectado a bomba de vacío.....	77
Figura 40: Papel de filtro de dimensiones y peso conocido.....	77
Figura 41: Contraste entre dos muestras, la de la izquierda tiene un tono blanquecino, indicador de presencia de cloruros.....	78
Figura 42: Disposición de los crisoles en el interior del horno.....	79
Figura 43: Tamices utilizados para el ensayo.....	81
Figura 44: Máquina de ensayo de resistencia a flexión y compresión.....	84
Figura 45: Probetas en cámara para el ensayo de retracción.....	86
Figura 46: Probeta sometida a la lectura de la longitud.....	87
Figura 47: Preparación de las probetas de ensayo.....	89

Figura 48: Peso de una de las probetas dentro del recipiente	90
Figura 49: Preparación de las probetas de ensayo	92
Figura 51: Curva Granulométrica del R.C.D.....	99
Figura 52: Resistencia a flexión de probetas elaboradas con arena natural, utilizando filler silíceo en el primer caso, y cenizas volantes de biomasa como sustituto en el segundo caso.	102
Figura 53: Resistencia a flexión de probetas elaboradas con árido reciclado, utilizando filler silíceo en el primer caso, y cenizas volantes de biomasa como sustituto en el segundo caso.	104
Figura 54: Comparación entre valores obtenidos con probetas de agua residual y agua potable, variando el porcentaje de cemento contenido.....	106
Figura 55: Comparación entre valores obtenidos con probetas de agua residual y agua potable, variando el porcentaje de cemento contenido.....	108
Figura 56: Resistencia a compresión de probetas elaboradas con arena natural, utilizando filler silíceo en el primer caso, y cenizas volantes de biomasa como sustituto en el segundo caso.	110
Figura 57: Resistencia a compresión de probetas elaboradas con árido reciclado, utilizando filler silíceo en el primer caso, y cenizas volantes de biomasa como sustituto en el segundo caso.	111
Figura 58: Comparación entre valores obtenidos con probetas de agua residual y agua potable, variando el porcentaje de cemento contenido.....	114
Figura 59: Comparación entre valores obtenidos con probetas de agua residual y agua potable, variando el porcentaje de cemento contenido.....	116
Figura 60: Efecto de la sustitución de filler silíceo por cenizas volantes en la retracción de probetas con árido constituido por arena natural.....	119
Figura 61: Efecto de la sustitución del filler por cenizas de biomasa en la variación de la masa de las probetas elaboradas con arena natural como árido constituyente del mortero.	121
Figura 62: Efecto de la sustitución de filler silíceo por cenizas volantes en la retracción de probetas con árido constituido por R.C.D.	124

Figura 63: Efecto de la sustitución del filler por cenizas de biomasa en la variación de la masa de las probetas elaboradas con R.C.D. como árido constituyente del mortero.	126
Figura 64: Variación del peso en ensayo de permeabilidad AN SF 1-1.....	139
Figura 65: Variación del peso en ensayo de permeabilidad AN SF 1-2.....	139
Figura 66: Variación del peso en ensayo de permeabilidad AN SF 1-3.....	140
Figura 68: Variación del peso en ensayo de permeabilidad AN CBL 1-2	141
Figura 70: Variación del peso en ensayo de permeabilidad AR SF 1-1	142
Figura 71: Variación del peso en ensayo de permeabilidad AR SF 1-2.....	142
Figura 72: Variación del peso en ensayo de permeabilidad AR SF 1-3.....	143
Figura 73: Variación del peso en ensayo de permeabilidad AR CBL 1-1	143
Figura 74: Variación del peso en ensayo de permeabilidad AR CBL 1-2	144
Figura 75: Variación del peso en ensayo de permeabilidad AR CBL 1-3	144

1. INTRODUCCIÓN

La ingeniería como ciencia aplicada ha demostrado la capacidad para brindar soluciones de calidad desde el punto de vista técnico y económico frente al planteamiento de diversos problemas que afectan a nuestro mundo día a día. En buena parte, el método de ensayo y error ha servido de impulso para la evolución de diferentes productos y procesos a lo largo de los años, optimizando tiempo y recursos, con el objeto de maximizar el beneficio económico si es perseguido un interés financiero, o de mejorar la calidad de vida de la población, si el interés es social.

En la época actual, donde se han evidenciado las consecuencias de las acciones que el hombre ha tenido sobre su entorno, son mayores los esfuerzos por controlar o evitar el impacto ambiental que tienen las diferentes actividades humanas. Mediante disposiciones legales ó campañas de organizaciones no gubernamentales se insta a actuar, razonar y a tomar decisiones partiendo de la valoración del impacto que tienen el desarrollo de múltiples actividades, tomando en cuenta además la valoración de múltiples alternativas cuando se trata de nuevas implantaciones o proyectos.

La industria de la construcción no escapa de dicho juicio. De acuerdo a cifras presentadas en las *Jornadas de Hormigones Especiales: El reciclado como componente*, desarrolladas el 25 de Febrero del presente año en la Escuela Politécnica Superior de Belmez, esta industria consume una elevada cantidad de materia prima, donde el 40% de sus desechos son recuperables. Además, se estima que el consumo de cemento es de 300 kg/hab-año, por cuanto existen razones para evaluar el uso de otros materiales alternativos en la construcción, o sustituir proporciones de los ya existentes por otros que otorguen prestaciones de calidad y un valor agregado asociado a la contribución con la sostenibilidad ambiental.

Entre las líneas de investigación activas en el área de materiales alternativos en la industria de la construcción, se encuentra el uso de cenizas volantes de biomasa como adiciones o sustituciones en los materiales constituyentes de morteros y de hormigones estructurales. Puede decirse que tiene un amplio rango de análisis, en vista de la gran variedad de cenizas volantes de este tipo en existencia, las cuales varían en composición química, teniendo un

comportamiento muy variable entre unas y otras, influyendo o no en la actividad puzolánica desarrollada para formar un conglomerante hidráulico.

La norma ASTM C-618 y la norma EHE-08 admiten el uso de cenizas volantes procedentes del carbón mineral como componente de las mezclas de hormigón estructural, el cual es ampliamente usado como combustible de las centrales termoeléctricas para la generación de energía. Sin embargo, en el caso de morteros se ha decidido investigar sobre la influencia de cenizas volantes de biomasa, debido a la amplia variedad y origen existente, pudiendo ejemplificar las provenientes del carbón vegetal producto de la combustión de la madera, o las provenientes de cáscaras de arroz, residuos del aceite de oliva ó del aceite de palma.

En el caso andaluz, se observa con gran interés el uso de subproductos de la extracción del aceite de oliva, y es que posee un volumen de producción sumamente importante, con un 70% de la cuota de mercado español haciendo referencia al consumo interno, y en términos de exportación, tiene el 40% de la cuota de mercado en China, por citar un país. En el caso que plantea esta investigación, se procederá a evaluar la influencia de este tipo de cenizas volantes de biomasa, como material sustituto del filler para la fabricación de morteros, evaluando propiedades en estado endurecido fundamentalmente, pero tomando en cuenta la apreciación de parámetros como la consistencia en estado fresco, como punto de partida para la aprobación de su dosificación.

La fabricación de morteros ambientalmente amigables no sólo se limita a la innovación en la utilización de constituyentes alternativos en el cemento o en los áridos. En la actualidad es conocida la importancia del agua potable para el uso doméstico, y la progresiva reducción de las fuentes de acceso a tan preciado recurso. De allí que muchos esfuerzos se destinan a no derrochar el agua potable y a sustituir la misma por otro tipo de componentes en aquellos casos en los que su uso no es estrictamente necesario, buscando potenciar su reutilización.

En el caso del agua de amasado, se han realizado investigaciones para sustituir el uso de agua potable en las amasadas por agua residual tratada. La instrucción de hormigón estructural EHE-08 en el artículo 27 no prohíbe el uso de agua residual tratada, pero si

limita a valores límites ciertos constituyentes, a modo de evitar la presencia de cualquier agente capaz de causar una agresión química sobre las mezclas de mortero o el hormigón estructural.

Dependiendo de las características del efluente en base al sistema de tratamiento utilizado en una Estación Depuradora de Aguas Residuales (E.D.A.R.), las características del agua pueden variar, por cuanto se ha previsto la realización de un estudio del esquema de funcionamiento de la E.D.A.R. del poblado de Villaviciosa, en paralelo con los ensayos de caracterización química del agua, para evaluar el cumplimiento de los parámetros establecidos en la instrucción de hormigón estructural EHE-08.

La investigación permitirá en una de sus fases la sustitución del agua de amasado potable por agua residual tratada, comparando con mezclas de mortero de referencia, y evaluando las propiedades mecánicas en estado endurecido para validar su cumplimiento. Su potencial utilización tendría un impacto positivo sobre un mejor aprovechamiento de los recursos hídricos, permitiendo destinar mayores fuentes de agua potable a otros usos que realmente lo ameritan.

Todos los planteamientos que brevemente se han descrito y cuya intención es dar una justificación al problema de investigación, se han enfocado sobre la fabricación de morteros para su uso en edificaciones; sin embargo, una vez que el edificio ha cumplido con su vida útil, o por alguna razón ajena es necesario derribarlo, se generan un conjunto de escombros que al ser dispuestos en vertederos, ocasionan un impacto negativo sobre el medio ambiente. En consecuencia, se ha buscado investigar para desarrollar un ciclo que permita reciclar estos desechos de la industria, y aprovecharlos en la construcción de nuevas edificaciones.

Los Residuos de Construcción y Demolición, denominados R.C.D., los cuales provienen básicamente de la mampostería a base de bloques de arcilla, así como de restos de mortero y hormigón, tienen un potencial aprovechable como sustitutos de áridos, previa molienda de estos elementos hasta obtener una granulometría apropiada y acorde con la existente en los áridos naturales, que permita su aptitud, así como la exclusión de cualquier tipo de desecho mezclado a estos componentes que pueda ser tóxico para quienes habiten la

edificación o que sea perjudicial para la mezcla misma de mortero; de ninguna manera su uso debe comprometer las exigencias Básicas de Seguridad y Estabilidad, así como las de Aptitud al Servicio, establecidas en el Código Técnico de la Edificación.

El desarrollo de esta investigación permitirá el uso de R.C.D. procedente de una planta procesadora ubicada en la ciudad de Córdoba, administrada por la empresa Gecorsa. Con esta investigación se reafirma el compromiso por parte de la Escuela Politécnica Superior de Belmez en contribuir con el desarrollo de la región, trabajando en el desarrollo de nuevos materiales de eficacia, con una viabilidad técnica y económica, capaces de mitigar el impacto de una industria tan importante como es la construcción.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Evaluar la viabilidad técnica del uso de cenizas volantes de biomasa, residuos de construcción y demolición (R.C.D.) y agua residual tratada como alternativa a los componentes convencionales de las mezclas de morteros.

2.2. Objetivos Específicos

- Describir el esquema de funcionamiento de la Estación Depuradora de Aguas Residuales (E.D.A.R.) del poblado de Villaviciosa de Córdoba.
- Comparar los parámetros químicos del agua residual tratada con los especificados en la instrucción de hormigón estructural EHE 08 para el agua de amasado.
- Describir el comportamiento mecánico de morteros elaborados con agua residual tratada
- Definir las propiedades físicas de morteros endurecidos fabricados con cenizas volantes de biomasa y R.C.D. en sustitución del filler y la arena natural, respectivamente.

3. ANTECEDENTES

El comportamiento de mezclas de mortero con cenizas volantes de biomasa depende en buena parte de la constitución química de los materiales, lo cual ha quedado evidenciado en los resultados obtenidos en múltiples investigaciones del área, que concluyen sobre ventajas y desventajas del uso de diferentes tipologías de cenizas, además de su influencia sobre el resto de los componentes de las mezclas, permitiendo ajustar dosificaciones que garanticen un adecuado desempeño en estado fresco y endurecido.

Muchas investigaciones se han centrado en la evaluación de la influencia de las cenizas procedentes del carbón mineral, ya que son las aceptadas como adiciones dentro de morteros y hormigón estructural. De acuerdo con **Chindaprasirt, Buapa y Cao (2005)**, el uso de este tipo de cenizas es favorable para mantener condiciones adecuadas de trabajabilidad en los morteros, en vista que un incremento en el contenido de cenizas, se traduce en un descenso de la cantidad de agua requerida para la dosificación y los materiales adoptados en esta investigación.

En este sentido, la dosificación de estos morteros se compone por Cemento Mezclado, el cual contiene alrededor del 25% de material inerte como arena o material calizo con una finura apropiada para mejorar la cohesión; arena local de río; aditivos incorporadores de aire para mejorar la plasticidad; y las cenizas cuyo origen es el carbón de una central térmica Tailandesa, las cuales se han sustituido por el Cemento Mezclado en proporciones cemento/cenizas de 100:0; 80:20 y 60:40.

A efectos comparativos, se ha fabricado un mortero de referencia con Cemento Portland convencional sin adiciones de cenizas, y en todos los casos, se han realizado mezclas con y sin aditivo para evaluar su comportamiento, concluyendo en este apartado que la adición del mismo favorece la plasticidad de la mezcla reduciendo la cantidad de agua requerida. Continuando con las propiedades en estado fresco, la adición de este tipo de cenizas permite unos mayores tiempos de fraguado, lo cual en climas tropicales es beneficioso dadas las probabilidades de pérdida de agua por evaporación.

En este orden de ideas, la retención de agua resulta menor en la medida en que se incrementa el contenido de cenizas, puesto que su tamaño de partículas es superior a las del cemento que sustituye. De allí que ninguna de las mezclas cumple con el 70% de retención mínima establecido según la ASTM C91.

Con respecto al contenido de aire, se evidencia en los resultados un incremento en la misma forma en que se introduce una mayor proporción de cenizas, lo cual podría incurrir en ahorros frente al uso de aditivos incorporadores de aire; sin embargo, un contenido de aire excesivo tiene una afectación sobre la matriz del mortero y en las resistencias mecánicas, hecho demostrado con los resultados de resistencia a flexión y compresión, los cuales muestran un descenso en las resistencias con uso de aditivos, y también con incrementos en la proporción de cenizas volantes, obteniendo resultados por debajo de los requerimientos de la norma ASTM C91.

Pasando a estudios referentes a la evaluación de cenizas volantes de biomasa, se han obtenido resultados donde la relación entre incremento en proporción de cenizas y resistencias obtenidas no siempre es decreciente. **Cruz-Yusta, Mármol, Morales y Sánchez (2011)** realizaron mezclas de mortero con cemento Portland, arena dolomítica, arena de cuarzo como fuente de silicio, y calcita como *filler*, esta última sustituida por cenizas volantes de biomasa procedentes de un incinerador eléctrico de oliva, encontrando un incremento de resistencias con el aumento del contenido de cenizas, pero con un decrecimiento reportado tras una sustitución total.

Esto puede ser atribuido al hecho que la densidad de las cenizas es ligeramente inferior a la de la calcita, y ante un reemplazo total, el efecto es más notable, además que la distribución de tamaños de partículas de la calcita es más amplia que en las cenizas de biomasa, teniendo efecto en la compacidad de la mezcla.

También se realizaron mezclas sustituyendo las cenizas por el cemento, obteniendo un decrecimiento de las resistencias mecánicas, lo cual evidencia la baja actividad puzolánica de las cenizas, además que el cemento posee una curva granulométrica más amplia. En síntesis, la mezcla con sustitución del 10% de cenizas por cemento fue la única que cumplió

con la resistencia a compresión de 5N/mm^2 para un mortero clasificado como M5 de acuerdo a la norma UNE-EN 998-2.

Para realizar un comparación más justa, **Maschio, Tonello, Piani y Furlani (2011)**, realizaron mezclas de mortero sustituyendo cenizas de biomasa procedentes de la combustión de madera por cemento Portland CEM II/B-LL en proporciones en peso variando del 5% al 30%, en cuyo caso la distribución granulométrica de ambos materiales fue muy similar, para evitar influencias de este aspecto sobre los resultados obtenidos.

Sin embargo, se obtuvo un decrecimiento de las resistencias en la medida en que se aumentó el porcentaje de sustitución, por cuanto sólo sustituciones del 5% presentaron valores similares a los del mortero de referencia sin sustituciones.

La absorción resultó baja en los morteros con mayores resistencias, incrementándose en la medida en que la resistencia decrece, puntualizando el hecho de una absorción por encima del 5% para las muestras con sustituciones de cenizas por encima del 10%, las cuales resultan más porosas y en consecuencia, más susceptibles de sufrir una degradación de la matriz que conforma el mortero.

Continuando con el apartado granulométrico, además de procurar en las investigaciones una sustitución de materiales con una granulometría similar, es importante el estudio e influencia de cada fracción sobre el comportamiento de la mezcla y su reacción química en conjunto con el resto de los materiales. De acuerdo a **Tkaczewska, Mróz y Łój (2012)**, la fracción más activa es aquella que posee un tamaño de partículas inferior a 45 micras, relacionada con el incremento de resistencia temprana a compresión, mientras que la fracción gruesa es la responsable de la ganancia a resistencia a compresión con el paso del tiempo.

En esta investigación se evaluó la factibilidad técnica de incorporar cenizas volantes procedentes de carbón bituminoso y biomasa leñosa quemadas en forma conjunta, obtenidas de la segunda y tercera sección del precipitador electrostático de las centrales eléctricas, en mezclas de mortero con Cemento CEM I/42.5 R. En este caso, se ha

identificado que en estas cenizas volantes domina una microestructura cristalina y con presencia de cuarzo, que podría mejorar la actividad puzolánica.

Desde el punto de vista práctico, la actividad puzolánica puede ser medida, y representa el cociente entre la resistencia a compresión de morteros con 75% de cemento CEM I/42.5 R y 25% de cenizas, y la resistencia a compresión de morteros sin adiciones a los 28 y 90 días. Los resultados obtenidos indicaron que todos los morteros con adiciones de cenizas volantes de biomasa tanto de la segunda como de la tercera sección lograron obtener la actividad mínima del 75% y 85%, a los 28 días y 90 días, respectivamente.

A temprana edad, los ensayos de compresión de las muestras con cenizas a los dos días mostraron valores más bajos que aquellas muestras sin adiciones; sin embargo, tuvieron valores de resistencia superiores a los 20MPa exigidos como valor mínimo. Por otra parte, a los 90 días, la resistencia de todos los morteros con cenizas fue superior a la de las muestras sin adiciones, lo cual evidencia una ganancia de resistencia a largo plazo.

La actividad puzolánica es considerada como un parámetro representativo de la efectividad de uso de cenizas volantes dentro de los morteros; **Sata, Tangpagasit, Jaturapitakkul y Chindaprasirt (2012)**, evaluaron la influencia de la variación de la relación agua/aglutinante sobre morteros con adiciones de cenizas volantes procedentes de cáscaras de arroz mezcladas con las de corteza de eucalipto (RHBA), y aquellas procedentes de aceite de palma (POFA).

Las proporciones de sustitución de cenizas por cemento variaron en este estudio entre el 10% y el 40%, y los valores de relación agua/aglutinante se fijaron en 0,50; 0,575 y 0,65. Las cenizas y parte de la arena de río fueron molidas hasta obtener tamaños de partículas similares a los del cemento ordinario, permitiendo en el caso de la arena que no es reactiva, su reemplazo por parte del cemento ordinario y así evaluar su influencia en el grado de empaquetamiento del material y en la reacción puzolánica del cemento y el agua en las mismas proporciones en las que se sustituyeron las cenizas.

De los resultados de los ensayos a compresión se obtienen conclusiones interesantes, y es que los morteros con sustitución de cenizas entre el 10% y el 20% mostraron a los 90 días

resistencias superiores a los morteros sin adiciones, efecto justificado en el efecto de empaquetamiento de las cenizas y en la actividad puzolánica de las mismas, que permiten obtener una ganancia de resistencias.

A edades más tempranas (7 y 28 días), en algunos casos la resistencia de los morteros con adiciones estuvieron por debajo de las del mortero de referencia, pero aún así, superan el valor mínimo del 75% del índice de actividad establecido en la norma ASTM C618. Es importante señalar también que para un mismo tipo de cenizas, un incremento en sustitución de cemento supone un decrecimiento en las resistencias.

Para el caso de los morteros donde se sustituyó parte del cemento por arena molida, fue evidenciada la inactividad reactiva de la misma, dado que para una misma relación agua/aglutinante, a diferentes edades de curado no hubo cambios significativos en la resistencia del material, por cuanto las pequeñas variaciones pueden ser atribuidas a la actividad misma del cemento y no a un comportamiento puzolánico de la arena. Partiendo de este punto, se consideró la arena como un material inerte, y para mismos porcentajes de sustitución y relación agua/aglutinante, la diferencia de estas resistencias respecto a las resistencias obtenidas con sustitución de cenizas, permitió obtener las resistencias a compresión debido al efecto “*filler*” y puzolánico de las cenizas.

Se concluye con los resultados que para una misma relación agua/aglutinante, la resistencia a compresión de los morteros con sustitución por RHBA y POFA tiende a incrementarse con el aumento de la proporción de dichas cenizas y con la edad de curado, y además, para un mismo porcentaje de reemplazo, la resistencia a compresión se incrementa en la medida que lo hace la relación agua/aglutinante, hecho más notorio en las cenizas tipo RHBA. Además, los morteros con cenizas de tipo RHBA mostraron valores de resistencia a compresión ligeramente superiores a aquellos que contenían cenizas de tipo POFA, debido al mayor porcentaje de Silicio en la primera.

La norma ASTM C-618, prohíbe el uso de cenizas volantes de biomasa como componentes en mezclas de hormigón. Sin embargo, **Wang y Baxter (2007)**, realizaron mezclas de hormigón con cenizas de biomasa procedentes del carbón vegetal, concluyendo a partir de la reacción álcali/sílice, que el uso de cenizas volantes de biomasa permite reducir el

potencial de expansión en comparación con las cenizas volantes comerciales clase C, aún cuando las primeras tienen un contenido de álcali superior.

Como parte de los objetivos de esta investigación, se prevé estudiar la influencia del uso de desechos de construcción y demolición (R.C.D.), como sustituto del árido natural. A propósito de este aspecto, **Jiménez, Ayuso, López y Fernández (2013)**, realizaron mezclas de morteros sustituyendo en forma progresiva arena natural por agregado reciclado cuyo origen fue tabiques de mampostería. Estos estudios se realizaron considerando un porcentaje de sustitución en volumen de hasta el 40%, tomando en cuenta una proporción cemento/árido 1:7 y una similitud entre las granulometrías de ambos áridos (natural y reciclado).

Evaluando la trabajabilidad de los morteros en este análisis, se concluye que en la medida en que se incrementa el porcentaje de sustitución, la trabajabilidad disminuye debido a que el árido reciclado posee una mayor absorción de agua y se introdujeron secos dentro de las mezclas. Con respecto a las propiedades mecánicas básicas, de este análisis se desprende el hecho que para los porcentajes de sustitución estudiados, se presentaron resistencias a flexión y compresión ligeramente superiores a las del mortero de referencia, sin grandes cambios, pero que fueron atribuidos a una sustitución hecha en volumen. En contraposición, **Corinaldesi y Moriconi (2009)**, realizaron mezclas de mortero con sustitución en peso, con una relación cemento/árido 1:3, obteniendo un decrecimiento de la resistencia a compresión y flexión con el incremento en los porcentajes de sustitución.

Martínez, Exteberría, Pavón y Díaz. (2013), evaluaron la influencia de diferentes tipos de áridos procedentes de residuos de demolición y construcción junto con materiales tipo *filler* sobre las propiedades en estado fresco y endurecido de mezclas de morteros. Los tres tipos de materiales reciclados fueron de origen netamente cerámico, así como mezclas de mortero y mampostería, y restos de hormigón, todos molidos. Por otra parte, los materiales tipo *filler* utilizados fueron cal hidratada, caliza y escorias de la industria del acero.

Se realizaron morteros de referencia con tres tipologías de arena para efectos comparativos, adoptando una relación cemento/agregado/*filler* de 1:4:2 en volumen, mientras que para las mezclas con agregado reciclado se usó una proporción 1:5:1 en volumen, motivado a que la

arena natural tenía un déficit de material fino, por cuanto se requirió una mayor proporción de *filler* en estos casos.

De este análisis destaca el hecho que los morteros realizados con arena natural y árido reciclado obtuvieron mayores resistencias a compresión cuando se usó el *filler* procedente de la escoria del acero. Por otra parte, el uso de R.C.D. proveniente netamente de material cerámico permitió un incremento en las resistencias obtenidas; sin embargo, los morteros realizados con arena natural alcanzaron mayores valores de resistencia tanto a compresión como a flexión, motivado a una mayor absorción de agua por parte del árido reciclado y a una elevada porosidad.

Además de la evaluación del R.C.D. dentro de los morteros, **Sales y Rodrigues (2009)** estudiaron la influencia conjunta del uso de desechos de construcción y demolición junto a desechos secados y molidos procedentes de los lodos de decantación de una estación depuradora de aguas residuales para la preparación de morteros. En síntesis, utilizando una relación cemento/agregado 1:8, se elaboraron probetas de mortero utilizando arena natural para efectos de referencia, además de probetas sustituyendo el 2% de arena por desechos secados y molidos procedentes de lodos de decantación de la EDAR, y un tercer grupo de probetas usando el árido reciclado de la construcción, cuyo 2% se sustituyó por los desechos secados y molidos de lodos.

El estudio, centrado desde el punto de vista mecánico, concluyó que las probetas de morteros de referencia obtuvieron las mayores resistencias a compresión a los 28 días; en el caso de las que incorporaron los desechos provenientes de los lodos de decantación, las que tuvieron arena natural como componente principal tuvieron una resistencia menor a las que incorporaron el árido reciclado, en vista que las cantidades de agua usadas en el primer caso fueron menores, lo cual, sumado al hecho de una elevada absorción de agua por parte de los desechos molidos de lodo, generó un déficit de agua para la reacción con el cemento, disminuyendo su potencial endurecimiento.

Así como se ha planteado el uso de R.C.D. incorporado como agregado dentro de esta investigación, también se ha previsto la sustitución de agua potable por agua residual tratada para efectos de amasado. En este sentido, **Diéguez (2011)**, realizó mezclas de

hormigón estructural con cemento Portland tipo III, incorporando agua residual tratada en el amasado; sus resultados mostraron variaciones superiores al 10% respecto a probetas realizadas con agua potable, en términos de la resistencia a compresión.

Tomando esto como referencia, **Yepes (2013)**, quién también realizó mezclas de hormigón estructural con agua residual tratada, obtuvo resistencias inferiores a las probetas fabricadas con agua potable, pero sin superar el umbral del 10% de variación; su conclusión se fundamenta en que estas mezclas se realizaron con cemento Portland convencional tipo I, añadiendo que el uso de cemento Portland tipo III por parte de **Diéguez (2011)**, conlleva a una mayor vulnerabilidad de agresión química debido a que este cemento posee un mayor contenido de cal libre y cal de hidrólisis, considerando además que el agua residual de ese estudio poseía un mayor contenido de nitratos.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Materiales

4.1.1. Árido Natural

4.1.1.1. Descripción

Dentro de los materiales concebidos para ser utilizados en el presente proyecto de investigación, se ha previsto el uso de arena natural, procedente de la planta de Áridos Álvarez S.L., material que inicialmente se ha dispuesto en sacas en el patio exterior de los laboratorios de ensayos y amasadas, sujeto a la acción de la intemperie, por cuanto dicho material ha sido sometido a una serie de trabajos preliminares que adecúen su uso dentro de la investigación, los cuales serán descritos en el siguiente punto.

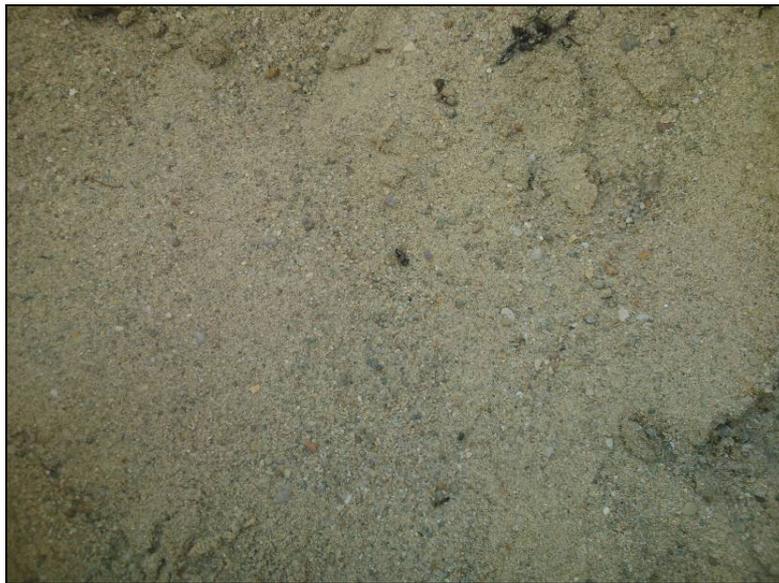


Figura 1: Aspecto de la arena en estado natural

4.1.1.2. Trabajos Preliminares

Como se ha reseñado en el punto anterior, para la utilización del árido se ha requerido de un trabajo primario, cuya secuencia a continuación se describe. En primer lugar, la capa superficial de material existente en las sacas ha sido retirada, debido a la existencia de materia orgánica (principalmente restos de vegetación e insectos muertos), la cual podría alterar el comportamiento de las amasadas de mortero, incurriendo en desviaciones del comportamiento de este tipo de mezclas, como por ejemplo, el fraguado.

A continuación, se realizó el tamizado de la arena natural por el cedazo de 4mm de abertura, mediante una operación de tamizado manual en paralelo con otra por medios mecánicos para agilizar el rendimiento y los tiempos de trabajo.



Figura 2: Tamiz de 4mm referencial

Posteriormente, a efectos de homogeneizar el material existente, se efectuó una operación de cuarteo en varias oportunidades hasta obtener cantidades de material cercanas a 17 kg aproximadamente, las cuales se almacenaron en sacos plásticos en el interior de los

laboratorios, para evitar afectaciones por el medio ambiente exterior, y para conservar la humedad existente en toda la muestra.



Figura 3: Operación de cuarteo

4.1.2. Desechos de Construcción y Demolición (R.C.D.)

4.1.2.1. Descripción

El material reciclado proviene de la planta de Residuos de Construcción y Demolición administrada por Gecorsa, en la ciudad de Córdoba.



Figura 4: Aspecto original del R.C.D.

4.1.2.2. Trabajos Preliminares

El tratamiento de los residuos de construcción y demolición fue muy similar al adoptado en la arena natural. En primer lugar, se procedió al tamizado del material por el cedazo de 4mm, considerando la porción pasante la adecuada para la investigación, y desechando la parte retenida, que se constituyó fundamentalmente de restos de fábrica, piezas cerámicas y otros.

Una vez realizada la operación de tamizado, mediante operación manual y mecánica en simultáneo, se realizó el correspondiente cuarteo del material para homogeneizarlo y garantizar así, propiedades uniformes en toda la muestra.

El acopio se realizó en el interior del laboratorio, a efectos de evitar cualquier tipo de afectación en la intemperie.



Figura 5: Condiciones de acopio de los materiales en bolsas plásticas

4.1.3. Cemento

4.1.3.1. Descripción

En esta investigación, se han utilizado dos tipologías distintas de cementos para las diferentes amasadas a efectos comparativos, lo cual será descrito más adelante en el capítulo 4, permitiendo una evaluación del comportamiento de los morteros bajo el uso de estos dos tipos de cementos comerciales que a continuación se describen.

El primero de ellos es cemento tipo CEM I 52.5 R, el cual es suministrado por Cementos Cosmos S.A., y es catalogado como cemento de muy alta resistencia a la compresión y elevada resistencia inicial. Las características resaltantes se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 1: Especificaciones técnicas del Cemento CEM I 52.5 R

ESPECIFICACIONES		
Composición	Valor Norma	Valor Habitual
Clinker	95-100 %	≥ 95 %
Minoritarios	0-5 %	≤ 5 %
Exigencias Químicas	Valor Norma	Valor Habitual
Pérdida por calcinación	≤ 5,0 %	< 3,2 %
Residuo Insoluble	≤ 5,0 %	< 1,0 %
Sulfato	≤ 4,0 %	< 4,0 %
Cloruros	≤ 0,1 %	< 0,02 %
Cromo VI soluble en agua	≤ 0,0002 %	< 0,0002 %
Exigencias Físicas	Valor Norma	Valor Habitual
Expansión (Le Chatelier)	≤ 10 mm	< 2,5 mm
Tiempo de fraguado mínimo	≥ 60 min	> 85 min
Tiempo de fraguado máximo	≤ 720 min	< 355 min
Exigencias Mecánicas	Valor Norma	Valor Habitual
Resistencia a la compresión (2 días)	≥ 30,0 MPa	> 38,0 MPa
Resistencia a la compresión (28 días)	≥ 52,5MPa	> 57,0 MPa

La segunda tipología de cemento usada corresponde al CEM II/B-L 32.5 N, suministrado de igual manera por Cementos Cosmos S.A., y catalogado como Cemento Portland con caliza. Sus características más importantes se encuentran reseñadas a continuación:

Tabla 2: Especificaciones técnicas del Cemento CEM II/B-L 32.5 N

ESPECIFICACIONES		
Composición	Valor Norma	Valor Habitual
Clinker	65-79 %	≥ 65 %
Caliza	21-35 %	≤ 35%
Minoritarios	0-5 %	≤ 5 %
Exigencias Químicas	Valor Norma	Valor Habitual
Sulfato	≤ 3,5 %	< 3,5 %
Cloruros	≤ 0,1 %	< 0,04 %
Cromo VI soluble en agua	≤ 0,0002 %	< 0,0002 %
Exigencias Físicas	Valor Norma	Valor Habitual
Expansión (Le Chatelier)	≤ 10 mm	< 2,5 mm
Tiempo de fraguado mínimo	≥ 60 min	> 75 min
Tiempo de fraguado máximo	≤ 720 min	< 275 min
Exigencias Mecánicas	Valor Norma	Valor Habitual
Resistencia a la compresión (2 días)	≥ 16,0 MPa	> 24,0 MPa
Resistencia a la compresión (28 días)	≥ 32,5MPa	> 34,0 MPa
	≤ 52,5 MPa	< 52,5 MPa

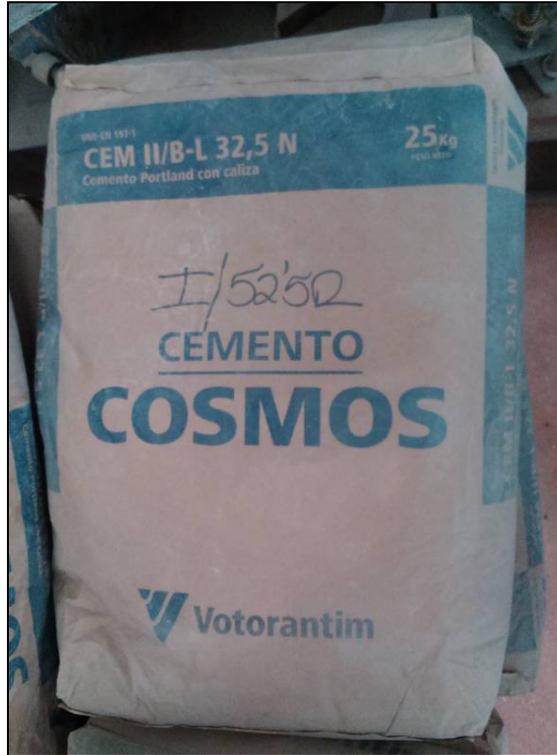


Figura 6: Saco de Cemento CEM II/B-L 32.5 N

4.1.4. Agua de amasado

El agua de amasado se tomó directamente del grifo del laboratorio de ensayos, a modo de asemejar las condiciones de trabajo con las de puesta en obra; sin embargo, como parte de los objetivos de la investigación, y de acuerdo al método que será descrito en los apartados siguientes, se realizaron amasadas con agua procedente de la Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) del poblado de Villaviciosa, en la provincia de Córdoba, con el objeto de evaluar las propiedades del mortero ante el uso de este tipo de agua, y así concluir sobre su factibilidad de uso. Los resultados de los ensayos de calidad serán reseñados en el capítulo 5.

4.1.5. Aditivo

El uso de aditivo en las mezclas obedece al hecho que en experiencias e investigaciones previas se han obtenido una variabilidad en las consistencias de los morteros, motivado a que no había una adecuada integración entre todos los materiales que los conforman. De allí que se ha recurrido al uso del aditivo Neoplast, el cual es plastificante y además incorporador de aire. De sus principales características se pueden mencionar las siguientes:

- Otorga una mayor plasticidad a la mezcla, consiguiendo superficies más lisas.
- Proporciona una mayor cohesión al conjunto, disminuyendo las posibilidades de segregación.
- Mejora la trabajabilidad del mortero, facilitando su puesta en obra.
- Aumenta su resistencia a temperaturas extremas mediante la inclusión de aire.

De acuerdo a información suministrada por el fabricante, es recomendable la adición de 10ml por cada 50kg de cemento. En este caso, se han añadido 0,1 ml a cada una de las amasadas

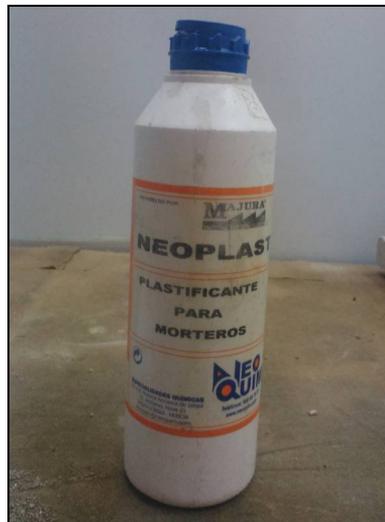


Figura 7: Aditivo Plastificante Neoplast

4.1.6. Cenizas Volantes de Biomasa

Para el cumplimiento de los objetivos de la investigación, se ha incluido el uso de cenizas volantes de biomasa, procedentes de un complejo industrial de la localidad de Linares, en la provincia de Jaén, administrado por la empresa Valoriza Energía, del grupo Sacyr-Vallehermoso, que tiene el doble objetivo de extracción de aceite de oliva para el consumo, así como el aprovechamiento de los desechos producidos en la extracción para la generación de energía eléctrica.

El orujillo es un subproducto obtenido de la extracción de aceite de oliva, el cual constituye la principal biomasa que se destina a una caldera dentro del complejo industrial, donde se incinera este material, cuyo vapor generado es capaz de alimentar una turbina de vapor para la generación de energía eléctrica. De este proceso se recogen las cenizas volantes usadas en la investigación.

El orujillo constituye la fuente principal de biomasa de esta planta, pero no exime el uso de otros tipos de biomasa procedentes de otros cultivos, de origen diverso, como el orujo de uva, la poda de olivar, cáscaras de almendra, así como rastrojos de algodón, girasol o ajo.



Figura 8: Aspecto de las cenizas volantes de biomasa del complejo situado en Linares

4.2. Métodos

4.2.1. Caracterización de la Estación Depuradora de Aguas Residuales (E.D.A.R.) del poblado de Villaviciosa de Córdoba

El apartado que será descrito a continuación corresponde al detallado del funcionamiento de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del poblado de Villaviciosa de Córdoba, municipio español ubicado en la provincia homónima, con una población estimada de 3774 habitantes. Estas instalaciones fueron inauguradas en el año 2006 y actualmente se encuentran bajo la administración de la empresa EMPROACSA.



Figura 9: Vista General de la Planta

4.2.1.1. Características Generales del Sistema

Los datos que se consideraron para la realización del proyecto de la E.D.A.R., fueron los siguientes:

Tabla 3: Datos Generales de partida en el diseño

Año Horizonte	2020
Población Adoptada (2020)	6000 hab-eq
Caudal Medio (2020)	15,97 l/s / 57,49 m ³ /h
Caudal Máximo pretratamiento (2020)	85,00 l/s / 307,63 m ³ /h
Caudal máximo biológico (2020)	33,95 l/s / 122,22 m ³ /h
Concentración DBO ₅	261 p.p.m.
Concentración Sólidos Suspendidos	304 p.p.m.
Concentración DBO ₅ a la salida	< 25 p.p.m.
Concentración Sólidos Suspendidos a la salida	< 35 p.p.m.
Rendimiento en todo caso	≥ 90 %

La línea de tratamiento proyectada consta de las siguientes unidades y procesos:

- Línea de Agua:
 - Aliviadero (by-pass general de la planta).
 - Pretratamiento (Desbaste, desarenado y desengrasado).
 - Medida del caudal del agua pretratada.
 - Aliviadero (by-pass del tratamiento biológico).
 - Reactor biológico con biodiscos rotatorios (dos unidades).

Decantador secundario.

Medida de caudal y obra de salida.

- Línea de Fangos:
 - Purga de fangos del decantador secundario
 - Medida de caudal de fangos en exceso
 - Espesador estático de fangos
 - Medida del caudal de fangos a deshidratación
 - Deshidratación de lodos en sala de deshidratación
 - Almacenamiento de fangos en tolva

- Líneas de Flotantes, reboses y vaciados
 - Pozo de bombeo de flotantes
 - Pozo de bombeo de reboses y vaciados



Figura 10: Tubería de ingreso del agua cruda a la arqueta de entrada

4.2.1.2. Aliviadero (By-Pass de cabecera)

Debido al hecho de presentarse eventuales infiltraciones que puedan generar aportaciones adicionales al colector, se ha colocado un aliviadero transversal en la entrada de la E.D.A.R. que busca limitar el caudal de entrada a 85 l/s. Este aliviadero tiene 80cm de longitud y 20cm de altura, mientras que la tubería de salida hacia el cauce receptor de las aguas aliviadas será de 315mm, con una pendiente de 0,5%.

4.2.1.3. Pretratamiento

Este sistema está formado por un conjunto compacto y prefabricado. El cuerpo y los depósitos están contruidos con chapa metálica de acero inoxidable. Consta de:

- Desbaste: Sobre un canal de 80cm de ancho va montado un tamiz que tiene una luz de paso de 3mm, con un sistema de autolimpieza y retirada de escombros por transportador de tornillo con un tramo final de compactación y escurrido de los mismos.
- Desarenado: La separación de arenas se realiza en un canal longitudinal de aproximadamente 1,6m de ancho; 10,3 m de largo y 1,20 m de calado. La recogida de las arenas se realiza mediante un transportador de tornillos situado paralelo a la longitud del canal, de modo tal que las arenas se transportan hacia un extremo del conjunto y de allí son llevadas nuevamente por un tornillo transportador inclinado, que las lleva a una tolva de descarga.
- Desengrasado: Un deflector longitudinal divide en dos partes la cuba hasta un cierto calado, a partir del cual existe comunicación entre ambas. El deflector separa la zona agitada de retirada de arenas, de otra zona más tranquila en la que se consigue una acumulación de las grasas desmenuadas gracias al aire que se introduce en el equipo. Estas grasas son barridas por una rasqueta de superficie hasta un extremo, donde se recogen en una tolva de descarga.

El efecto de desemulsión de las grasas es posible debido a la agitación e inclusión de aire a una tasa de $26\text{m}^3/\text{h}$, que se consigue mediante una soplante.



Figura 11: Unidad de pretratamiento

4.2.1.4. Aliviadero (By-Pass del reactor biológico)

Luego de la fase de Pretratamiento, se ha instalado un aliviadero lateral, para que el caudal de entrada al reactor biológico se limite al máximo caudal de aguas residuales adoptado ($33,94 \text{ l/s}$). Se evita con esto la entrada de caudales mayores que produzcan un funcionamiento inadecuado del reactor biológico y en general, del proceso de tratamiento. La longitud y altura de la lámina de agua sobre el vertedero serán 70cm y $11,3 \text{ cm}$, respectivamente.

4.2.1.5. Reactor Biológico con biodiscos

El sistema de depuración de Contactores Biológicos Rotativos (C.B.R.), es un sistema aerobio de tratamiento biológico secundario de aguas residuales donde la depuración se

realiza por medio de un sistema de película fija adherida a una superficie plástica corrugada. Este medio de soporte está sujeto en un eje sobre el que se hace rotar, de manera que gire lentamente quedando alternativamente expuesto al aire y sumergido en el agua (aproximadamente el 40% de la superficie queda en inmersión).

Cuando se inicia la puesta en funcionamiento del sistema, los organismos presentes en el agua residual empiezan a adherirse a las superficies que giran y se multiplican de manera que aproximadamente en una semana, toda la superficie del medio de soporte está cubierta por una delgada capa de biomasa. Esta extensa población microbiológica permite alcanzar altos niveles de tratamiento para tiempos de retención relativamente cortos. La película tiene un aspecto piloso o hilado y contiene una mezcla de población biológica, cuya superficie es mayor a la de la superficie del medio de soporte.

Debido a la rotación, el medio transporta a los organismos y una película de agua residual poniéndolos en contacto con el aire, de donde absorben oxígeno. Los organismos de biomasa disponen tanto del oxígeno disuelto como de la materia orgánica de la película de agua residual. Este efecto es continuo en el tiempo debido a la rotación, donde los microorganismos permanecen sumergidos en el tanque de agua residual. El oxígeno disuelto que no se utiliza por la película biológica, se mezcla con el licor mezcla del tanque manteniendo una concentración de oxígeno disuelto dentro del reactor.



Figura 12: Biodiscos rotatorios de la E.D.A.R.

Las fuerzas cortantes ejercidas sobre la biomasa al atravesar el agua residual retiran el exceso de biomasa del medio de soporte al licor mezcla, permitiendo una delgada película de biomasa uniforme y evitando la colmatación del medio. El efecto de mezcla que realiza el medio de soporte al girar mantiene los sólidos caídos del mismo en suspensión hasta que el flujo del agua residual tratada los arrastra del proceso para su separación y retirada.

De esta manera, el medio de soporte que gira cumple con las siguientes funciones:

- Facilita la superficie para el desarrollo de una extensa población biológica.
- Ofrece un contacto fuerte y uniforme al crecimiento bacteriano dentro del agua residual.
- Aireación eficiente de la masa biológica.
- Presenta un medio positivo de eliminar el exceso de biomasa de forma continua.
- Agitación del licor mezcla para mantener los sólidos en suspensión y mezclados en cada etapa de tratamiento.

La manera como se produce el crecimiento bacteriano adherido es distinta a la manera como se desarrolla en los sistemas de lechos bacterianos. En estos últimos la película biológica es suave y a menudo tiene una apariencia gelatinosa. El sustrato soluble y oxígeno disuelto debe aportarse a la parte de la biomasa cercana al material soporte por difusión. Debido a que la parte de biomasa más al exterior consume con mayor rapidez una mayor cantidad de oxígeno disuelto, la parte inferior queda a menudo en condición anaeróbica, y es este proceso el principal responsable del desprendimiento de grandes cantidades de película biológica. Con el oxígeno y sustrato limitados tan sólo para la parte externa de la biopelícula, sólo esa fracción de la biomasa está tratando activamente el agua residual. En cambio, en el proceso de biodiscos rotatorios, la biomasa es hilosa y proyectada hacia fuera dentro de la película adyacente de agua residual, por cuanto la superficie biológica activa supera al área del medio de soporte.

La estructura en forma de filamentos de la biomasa no se debe a la presencia de un microorganismo en particular, sino al proceso de rotación. El arrastre continuo dentro del agua residual, y el drenaje del agua que se ha introducido en el medio al salir del tanque, originan el crecimiento en forma de filamentos macroscópicos alargados. Esta estructura pilosa es más apreciable en las etapas iniciales del medio de soporte, donde las concentraciones de DBO son mayores y la película es más gruesa, por cuanto va decreciendo en el sentido de avance. A diferencia de los lechos bacterianos, el proceso de biodiscos rotatorios emplea el corte hidráulico controlado como el principal mecanismo de retirada del exceso de crecimiento biológico. El crecimiento piloso se da en longitud y grosor hasta que no pueda soportar más la fuerza ejercida por la rotación, y la película que cae tiene la forma de agregados relativamente largos de biomasa densa que decanta rápidamente en el decantador final.

La rotación del medio también facilita la turbulencia en la zona comprendida entre la biomasa y el agua residual, de modo que el oxígeno disuelto y el sustrato soluble quedan uniformemente accesibles para la porción más interior de la biomasa conjuntamente por el efecto de la mezcla y la difusión al conseguir que el agua atraviese el medio en condiciones cercanas al régimen turbulento, lo cual permite una aireación más efectiva. El medio de

soporte de los biodiscos rotatorios, ofrece una tasa de eliminación de sustrato 2 a 3 veces mayor al de los sistemas de película fija estática como los lechos bacterianos.

Cuando el efluente del Pretratamiento llega a los biodiscos en varias etapas, diversas colonias de microorganismos aerobios fijos absorben la materia orgánica disuelta del agua residual y flocculan la materia en suspensión para su posterior separación por gravedad. Una parte de la materia orgánica es oxidada a CO_2 y agua, mientras que otra parte se sintetiza como biomasa adicional. Se debe señalar que el exceso de biomasa es arrastrado del medio por la rotación y las fuerzas cortantes ejercidas por el agua residual.

Cada etapa del medio opera como un reactor biológico de lecho fijo de mezcla completa en el que existe un equilibrio dinámico entre el crecimiento biológico y la película que se arrastra. El agua residual tratada y la biomasa arrastrada, atraviesan por cada etapa del medio. Puesto que el agua residual pasa de una etapa a otra, se genera un progresivo incremento de tratamiento por las diferentes colonias biológicas que se desarrollan en cada etapa.

Las etapas iniciales del medio, las cuales reciben las mayores concentraciones de materia orgánica, desarrollan colonias de bacterias heterótrofas. De acuerdo al decrecimiento de la concentración de la materia orgánica en las siguientes etapas, las bacterias nitrificantes empiezan a aparecer en distintas formas de larga vida.

La biomasa arrastrada y la materia orgánica que floccula salen de la última etapa del medio con el agua residual tratada, y pasan al decantador secundario, donde los sólidos se separan para ser retirados. La concentración de los sólidos suspendidos del licor mezcla que llega al decantador secundario es aproximadamente igual a la concentración de sólidos en suspensión del afluente que está entre 50 mg/l y 200 mg/l para aguas residuales urbanas.

Este proceso se opera en reactores de un solo paso sin necesidad de recirculación de efluente. Además, como la biomasa adherida está en crecimiento constante, tampoco es necesario recircular los fangos. El empleo de sistemas de accionamientos simples con bajas velocidades de rotación supone que requieren poco mantenimiento. Debido a la

simplicidad de la operación, se necesita un mantenimiento y un tiempo de operación mínimo para manejar un sistema de este tipo.

Tabla 4: Parámetros de diseño del reactor biológico

Número Total de biodiscos	2
Superficie total del medio de soporte	23860 m ²
Número de Líneas	2
Número de etapas por línea	4
Número de fosos por línea	1
Número de biodiscos por fosa	1

Las medidas de la fosa son 8,03 m de largo, 4,43m de ancho y una altura de agua de 1,84m.

4.2.1.6. Decantador secundario

La decantación secundaria se lleva a cabo mediante un puente de decantación circular de gravedad, el cual posee las siguientes características:

Tabla 5: Características fundamentales del decantador secundario

Número de unidades	1
Diámetro	9 m
Calado Útil	3,0 m

Superficie de decantación	63,6 m ²
Pendiente del fondo	10%
Carga hidráulica a Caudal Medio Actual	0,58 m ³ /h/m ²
Carga hidráulica a Caudal Punta Actual	1,23 m ³ /h/m ²
Carga hidráulica máxima a Caudal medio futuro	0,90 m ³ /h/m ²
Carga hidráulica máxima a Caudal Punta futuro	1,92 m ³ /h/m ²
Tiempo de retención a caudal medio actual	5,45 h
Tiempo de retención a caudal punta futuro	1,64 h



Figura 13: Decantador secundario

Los fangos decantados se acumulan en la poceta central, donde se purgan para ser enviados al espesado.

El agua clarificada en la parte superior rebosa y se vierte sobre una canaleta perimetral de recogida. Finalmente, el agua tras su medida por caudalímetro electromagnético se conduce hacia la salida de la planta vertiendo a un pequeño arroyo aledaño. Este arroyo a su vez, es afluente aguas abajo al arroyo del pueblo.



Figura 14: Canaleta perimetral de recogida, junto al decantador secundario

4.2.1.7. Espesador de fangos

Los fangos del decantador secundario se purgan al espesador de fangos mediante bombas volumétricas de tornillo excéntrico helicoidal de las siguientes características:

Tabla 6: Características operativas de las bombas de impulsión

Caudal Unitario	3,0 m ³ /h
Altura Manométrica	6,0 m.c.a.

N° de bombas	2
Tubería de impulsión	65 mm

El espesador por gravedad es de sección circular y con una zona de concentración con pendiente de 55% en forma cónica, con una tapa superior para disminuir la emisión de olores. A continuación se presentan las dimensiones del mismo:

Tabla 7: Dimensiones del espesador de fangos

Diámetro	3 m
Altura cilíndrica útil	2,2 m
Altura cónica útil	2,4 m
Sección Horizontal	7,10 m ²
Volumen	21,85 m ³

4.2.1.8. Deshidratación de lodos y almacenamiento

El proceso de secado de los fangos se realiza mediante una unidad fija de deshidratación, la cual cuenta con una capacidad suficiente para procesar todos los fangos generados durante una semana en dos jornadas de 6 horas/día.

Los parámetros más significativos del equipo se mencionan a continuación:

Tabla 8: Parámetros significativos del proceso de deshidratación

Caudal diario de	17,5 m ³ /día
------------------	--------------------------

fangos espesados	
Caudal en 2 días/semana	8,75 m ³ /día
Peso en 2 días/semana	873,3 kg/día
Tiempo de extracción	6 horas
Caudal horario	2,9 m ³ /h
Caudal adoptado	3,0 m ³ /h
Destino	Decantador centrífugo



Figura 15: Equipo utilizado para el secado de los fangos

Los fangos deshidratados se almacenan en una tolva de 15m³ con una capacidad de almacenamiento semanal.



Figura 16: Unidad espesadora de fangos en primer plano junto a tolva de almacenamiento de fangos deshidratados

4.2.1.9. Unidad de Supervisión y Control

Para lograr una automatización y supervisión continua en tiempo real de los parámetros analíticos de la E.D.A.R. de Villaviciosa de Córdoba, la planta cuenta con sistemas e instalaciones técnicas que garantizan la calidad de las aguas residuales (pH y temperatura), así como el control y mando de los equipos electromecánicos e instrumentales existente.



Figura 17: Vista de un tablero de control de la E.D.A.R.

4.2.2. Factores de Riesgo

El desarrollo de una investigación de este tipo contempla el manejo de una cantidad importante de materiales, datos y resultados, así como el desarrollo de un conjunto de procedimientos orientados en este caso a la realización de amasadas de mortero y a la posterior evaluación de sus propiedades.

Partiendo de este punto, y dadas las diferentes fases que comprenden el método de trabajo, es reconocida la existencia de un conjunto de factores que podrían incidir de manera negativa sobre el desarrollo de las diferentes etapas, los cuales podrían conllevar a la

obtención de resultados que no son representativos del estudio en cuestión. De allí que se deben tener en cuenta estos factores de riesgo, los cuales se presentan a continuación:

Tabla 9: Factores de riesgo que pueden afectar el método de trabajo

FACTORES	ERRORES	SOLUCIONES
Humanos	Manejo inadecuado de los materiales, errores en la dosificación o seguimiento inadecuado de los pasos en los distintos procedimientos.	Procurar un método de trabajo repetitivo que permita un chequeo continuo y con mayor fiabilidad de la calidad de ejecución del proceso.
Ambientales	Variación en las temperaturas y humedades del laboratorio y/o áreas de almacenamiento en los días de ensayo (errores en la cuantificación de las dosificaciones).	Procurar un almacenamiento de los materiales en un lugar sin afectaciones de la intemperie, y realización del trabajo en laboratorio dentro de un cuarto cerrado con aire acondicionado.
Instrumentales	Inexistencia de calibración en los equipos y desgaste existente en la maquinaria	Chequeo de la calibración de los equipos previo a su uso, además de asegurar un desempeño adecuado de los mismos.

4.2.3. Normativa

Los diferentes ensayos realizados a los morteros así como su caracterización se han llevado a cabo de acuerdo a los procedimientos establecidos en las Normas UNE – EN (UNA NORMA ESPAÑOLA – EUROPEAN NORM), las cuales se reseñan a continuación:

- UNE-EN 998-2, “Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 2: Morteros para albañilería.” Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Mayo 2012.

- UNE-EN 1015-2, “Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 2: Toma de muestra total de morteros y preparación de los morteros para ensayo.” Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Junio 1999.
- UNE-EN 1015-3, “Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas)”, Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Septiembre 2000.
- UNE-EN 1015-11, “Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido”, Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Marzo 2000.
- UNE-EN 1015-12, “Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 12: Determinación de la resistencia a la adhesión para los morteros de revoco y enlucido, endurecidos aplicados sobre soportes”, Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Noviembre 2000.
- UNE-EN 1015-19, “Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 19: Determinación de la permeabilidad al vapor de agua para los morteros de revoco y enlucido”, Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Junio 1999.
- UNE 83831 EX, “Métodos de ensayo de los morteros para albañilería endurecidos: Determinación de la estabilidad dimensional de los morteros para albañilería endurecidos”, Octubre 2009.

4.2.4. Equipos

4.2.4.1. Descripción de los equipos de ensayo

A continuación serán descritos los diferentes aparatos utilizados en la realización de los ensayos sobre las amasadas de mortero fresco y endurecido

4.2.4.1.1. Mesa de Sacudidas

La mesa de sacudidas consta de un soporte que sirve de apoyo a una placa rígida horizontal sobre la que se realiza el ensayo. Asimismo consta de una leva de elevación que gira sobre un eje horizontal y que permite realizar las sacudidas a la mezcla de mortero durante el ensayo. Sobre el soporte y bajo la placa existe un eje vertical de elevación que traslada en la medida en que la leva gira.



Figura 18: Mesa de Sacudidas

Se incorpora también un molde troncocónico de acero inoxidable o de latón, de $60 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ de altura, con un diámetro interior de $100 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ en la base y de $70 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ en la parte superior. Tanto los bordes como las paredes del molde tienen una superficie lisa que evita la adherencia entre el mortero y el molde durante la realización del ensayo. Se debe indicar además que el plano que contiene los bordes superior e inferior son perpendiculares al eje del molde, dado que se debe enrasar el mortero y obtener una superficie horizontal y paralela a la de la placa rígida de la mesa de sacudidas.



Figura 19: Molde Troncocónico

El siguiente elemento se denomina pisón, el cual consiste en una barra rígida de sección circular y no absorbente, el cual posee un diámetro inferior al de la parte superior del molde de acero, para que pueda entrar en el interior de este a efectos de realizar la compactación. En síntesis, posee un diámetro de alrededor de 40 mm y una longitud de 200 mm. La superficie de la zona de apisonado debe ser plana y además perpendicular al eje del pisón, destacando además que este tiene una masa de 250 ± 15 g.



Figura 20: Pisón utilizado en la prueba de consistencia

También es necesaria una regla que al menos permita medir valores máximos de consistencia permitida, en torno a 185 mm de longitud, por cuanto lo más usual son reglas de 30 cm. Debe ser de limpieza sencilla y superficie lisa que evite la adherencia del mortero en estado fresco.

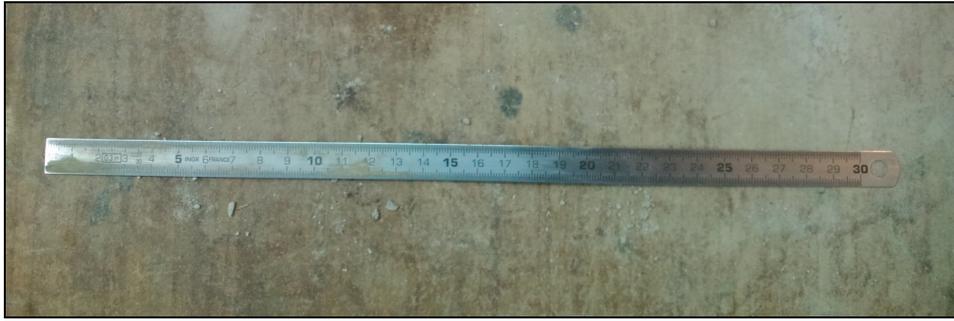


Figura 21: Regla utilizada para medir el escurrimiento del mortero

Por último, un enrasador metálico como el de la imagen, para retirar el material sobrante y así obtener una superficie de mortero plana y acorde con las exigencias de realización del ensayo de determinación de la consistencia.



Figura 22: Enrasador utilizado en el ensayo de consistencia

4.2.4.2. Descripción de la maquinaria auxiliar

A continuación se presenta una descripción de los diferentes equipos utilizados en la investigación para el desarrollo de las diferentes fases del proyecto.

4.2.4.2.1. Estufa

La estufa consiste en una cámara capaz de emitir calor en su interior, la cual, cerrada herméticamente, permite calentar todo lo que se encuentre en su interior. Es un equipo imprescindible al momento de estimar el contenido de humedad, en vista que el peso seco de los materiales se obtiene al ingresar estos dentro de la cámara, esperando que el agua contenida se evapore por medio de la elevación de temperaturas inducida por la estufa.

En función del tipo de ensayo, las temperaturas a las que deben ser sometidos los materiales varían, para cumplir con los requerimientos establecidos en los procedimientos normativos:

- Para los ensayos de humedad de los áridos, se deben mantener estos a una temperatura de 105 °C.



Figura 23: Estufa utilizada para el secado de los materiales

4.2.4.2.2. Amasadora

La amasadora es el equipo donde son realizadas las mezclas de mortero; este equipo se constituye de un recipiente con un volumen aproximado de 5 litros, de acero inoxidable, y que se fija en su base a un soporte que permite mantener su estabilidad durante el proceso de mezclado.

Por otra parte, la amasadora posee una pala, también de acero inoxidable, cuyo movimiento es accionado por medio de un motor eléctrico, capaz de hacerla girar a diferentes velocidades, de acuerdo a los requerimientos del operario. Esta pala tiene un movimiento de rotación alrededor de su propio eje, simultáneo a otro movimiento de rotación alrededor del eje del molde, ambos en sentidos opuestos.



Figura 24: Amasadora

4.2.4.2.3. Mesa Compactadora

Una vez que las mezclas se realizan y el ensayo de consistencia del mortero resulta favorable, se deben rellenar los correspondientes moldes que conforman las probetas de la investigación; estas deben poseer un adecuado nivel de compactación que garantice una densidad del material acorde.

Para este procedimiento se usa una mesa compactadora, de forma rectangular, la cual se encuentra unida rígidamente mediante dos brazos rígidos a un eje de rotación. Los moldes se colocan sobre la mesa compactadora, utilizando un equipo de fijación para impedir que estos se desplacen, mientras que la mesa es levantada por una leva de acero hasta una altura de 15mm desde donde se deja caer, constituyendo un ciclo repetitivo a una velocidad de rotación constante de la leva, permitiendo realizar 10 golpes o ciclos en aproximadamente 10 segundos.



Figura 25: Mesa Compactadora

4.2.5. Proceso de Fabricación de los morteros

4.2.5.1. Método de Amasado

Para realizar las diferentes amasadas, es importante prever las proporciones en las cuales serán mezclados los diferentes materiales, así como la consideración de los parámetros físicos dependientes del entorno y de características intrínsecas de los materiales, que influyen sobre las dosificaciones; de allí que sea imprescindible el conocimiento de la humedad, la absorción y la densidad de cada uno de los componentes.

En función de estas características es posible decidir sobre la relación agua/cemento, la relación árido/cemento, así como la previsión de los diferentes porcentajes de sustitución para las situaciones analizadas.

El procedimiento de mezclado se realiza de acuerdo al procedimiento descrito en la norma UNE-EN 1015-2. Una vez que se tiene el agua necesaria para el mezclado, se le añade el aditivo plastificante Neoplast; posteriormente, se coloca el agua dentro del molde de la amasadora y se acciona esta mediante el interruptor; esto permite mezclar durante unos breves segundos el aditivo con el agua. El siguiente paso consiste en la adición del cemento, y luego las cenizas volantes o el filler, dependiendo del tipo de amasada realizada, las cuales serán descritas en el apartado Y; posteriormente se añade el árido, bien sea arena natural o árido reciclado, dependiendo nuevamente del tipo de amasada.

Es importante que el tiempo de adición de los materiales, contado desde el contacto entre el cemento y el agua, no supere 40 segundos, y en total, el tiempo de mezclado será de tres (3) minutos. En este instante la amasadora será detenida y se procederá a la toma de muestras para la realización del ensayo de consistencia, y de resultar aprobado, se rellenaran los moldes que constituirán las probetas.

4.2.5.2. Determinación de la consistencia del mortero fresco

La determinación de la consistencia del mortero fresco se realiza de acuerdo al procedimiento descrito en la norma UNE-EN 1015-3, con la utilización de una mesa de sacudidas.

La consistencia es una medida del grado de fluidez y/o humedad presente en el mortero, y de alguna manera predetermina el grado de deformabilidad que tendrá este una vez sea

sometido a un determinado esfuerzo. Sin embargo, la consistencia no está directamente asociada con el comportamiento del mortero una vez sea utilizado por un operario o albañil, advertencia descrita en la citada Norma.

Antes de realizar el ensayo, se debe realizar una limpieza del disco de la mesa de sacudidas, así como de los bordes del molde troncocónico, con la ayuda de un pañuelo para retirar cualquier tipo de suciedad o polvo presente. A continuación, se lubrica con un poco de aceite tanto el disco como el molde, sin excesos, sólo con el objeto de facilitar una superficie lisa, y evitar la adherencia entre el mortero y el molde.

El siguiente paso es colocar el molde en el centro del disco de la mesa de sacudidas, y es allí cuando se agrega una parte del mortero dentro del molde hasta rellenar la mitad del mismo aproximadamente. En este momento se sujeta con una mano el molde sobre el disco, y con la otra, se utiliza el pisón para dar 10 golpes sobre el mortero colocado para compactar la mezcla a una densidad apropiada; el siguiente paso consiste en terminar de rellenar el molde dejando un excedente, y se procede nuevamente a realizar otros 10 golpes con el pisón.

Posteriormente, se enrasa el molde con la ayuda de la barra metálica, para obtener una superficie uniforme, manteniendo fijo el molde al disco de la mesa de sacudidas. Una vez hecha esta operación, se extrae el molde verticalmente en forma lenta y quedará la muestra de mortero expuesta sobre el disco en forma troncocónica.

Por último, se realiza el movimiento giratorio del eje bajo el disco de sacudidas, que permite elevar el disco y dejarlo caer en forma cíclica. Se deben realizar 15 ciclos o sacudidas, en 15 segundos aproximadamente. Con esto, el mortero escurrirá sobre el disco y tomará una superficie en forma circular.

Con el uso de la regla, se realiza la medición de cuatro (4) diámetros sobre la superficie del mortero, reportando como consistencia el valor medio en milímetros. De acuerdo a la norma UNE-EN 1015-2, el valor de consistencia aceptable será aquel comprendido entre 175 ± 10 mm, para una densidad esperada del mortero superior a 1200 kg/m^3 .



Figura 26: Medición de la consistencia del mortero

4.2.5.3. Fabricación del mortero endurecido

Una vez que se ha comprobado que las mezclas de mortero cumplen con el valor de consistencia establecido en la norma, se procede a rellenar los moldes. Este procedimiento es sencillo; previamente se deben lubricar los mismos con aceite, sin excesos, con el objeto de facilitar las labores de desmolde una vez el mortero esté en estado endurecido y así evitar su adherencia a la pared del molde.

En primer lugar, se rellenan los moldes hasta la mitad, aproximadamente, y de allí se llevan a la mesa compactadora, donde se fijan a la placa rectangular y se le otorgan 10 golpes mediante sacudidas a razón de una sacudida por segundo. Esto permitirá una compactación adecuada del mortero en el molde para conseguir la densidad esperada. Finalizado este proceso, se realiza la segunda fase de relleno hasta dejar un excedente, y se repite el ciclo de sacudidas en la mesa compactadora.

Una vez terminada la fase de compactación, se procede a retirar el excedente de material con el uso de la barra metálica enrasadora, procedimiento que se repite al menos dos veces con el propósito de lograr una superficie lisa y uniforme.



Figura 27: Probetas de mortero enrasadas

Una vez que se las probetas ya han sido realizadas, se dejan durante dos (2) días en la cámara húmeda, lo que permitirá el fraguado y endurecimiento de la mezcla. Pasado este tiempo, se procederá al desmolde, con la ayuda de un martillo que facilitará esta labor.



Figura 28: Martillo utilizado para el desmolde de las probetas

Una vez que se desmoldan las probetas, se dejan en la cámara de conservación, hasta transcurridos veintiocho (28) días de haber realizado la amasada, para la ejecución de los ensayos de resistencia a flexión y compresión.

4.2.6. Diseño Experimental

4.2.6.1. Sustitución de filler silíceo por cenizas volantes de biomasa

El primer estudio a desarrollar en esta investigación consistió en la evaluación de la influencia del uso de cenizas volantes de biomasa como sustituto del filler silíceo de la mezcla de mortero, partiendo de la dosificación en volumen que se muestra a continuación:

1 : 6: 0,5

Para la realización del mortero de referencia, la dosificación planteada se traduce en una (1) parte de cemento por cada seis (6) partes de árido (natural o reciclado), y media parte de filler silíceo. El segundo grupo de morteros tuvo una dosificación de una (1) parte de

cemento por cada seis (6) partes de árido (natural o reciclado), y media parte de cenizas volantes de biomasa del complejo industrial de Linares.

Los áridos fueron introducidos en la estufa antes de la realización de las amasadas, para evitar realizar correcciones de humedad en las diferentes dosificaciones, y así manejar las mismas cantidades de materiales en todos los casos. Considerando un volumen de 1600 cm³, la estimación del peso necesario de los diferentes componentes en las amasadas se realizó con la siguiente expresión:

$$\text{Peso requerido} = \frac{\text{Densidad} \times 1600\text{cm}^3 \times n^{\circ} \text{ partes}}{7,5 \text{ partes totales}}$$

La densidad se expresa en g/cm³, y el número de partes serán una (1) para el cemento, seis (6) para el árido y media (0,5) para las cenizas volantes de biomasa o el filler silíceo. El peso obtenido se expresa en gramos.

La denominación de las diferentes probetas es la que se enuncia a continuación:

- AN SF: Probetas de mortero elaboradas con una relación cemento / árido 1:6, fabricadas con arena natural y filler silíceo
- AR SF: Probetas de mortero elaboradas con una relación cemento / árido 1:6, fabricadas con residuos de construcción y demolición (árido reciclado) y filler silíceo.
- AN CBL: Probetas de mortero elaboradas con una relación cemento / árido 1:6, fabricadas con arena natural y cenizas volantes de biomasa.
- AR CBL: Probetas de mortero elaboradas con una relación cemento / árido 1:6, fabricadas con residuos de construcción y demolición (árido reciclado) y cenizas volantes de biomasa.

4.2.6.2. Sustitución de agua de amasado potable por agua residual tratada

En esta segunda parte del estudio, se procedió a evaluar la influencia del uso de agua residual tratada en las amasadas procedente de la Estación Depuradora de Aguas Residuales del poblado de Villaviciosa de Córdoba, como sustitución del agua potable convencional. Para ello se prepararon probetas de mortero usando agua residual tratada y agua potable, cemento tipo CEM I y CEM II, así como arena natural, bajo la siguiente dosificación en volumen:

1 : 6

En este caso la dosificación se fundamenta en una (1) parte de cemento por cada seis (5) partes de arena natural, tomando en cuenta una corrección de la humedad del árido contenido en las bolsas plásticas. Considerando un volumen de 1600 cm³, la estimación del peso necesario de los diferentes componentes en las amasadas se realizó con la siguiente expresión:

$$\text{Peso requerido} = \frac{\text{Densidad} \times 1600\text{cm}^3 \times n^{\circ} \text{ partes}}{7 \text{ partes totales}}$$

La densidad se expresa en g/cm³, y el número de partes serán una (1) para el cemento, seis (6) para el árido, expresando el peso obtenido en gramos. Adicionalmente, se prepararon probetas variando la proporción de cemento original, teniendo el 100%, 90% y 80% del contenido de cemento obtenido bajo una dosificación 1:6 cemento/árido. La denominación de las diferentes probetas se enuncia a continuación:

- CEM I AR 100/0: Probetas de mortero elaboradas con agua residual tratada, y con el 100% del cemento obtenido bajo la relación cemento / árido 1:6, utilizando arena natural y cemento CEM I 52.5 R.
- CEM I AR 90/0: Probetas de mortero elaboradas con agua residual tratada, y con el 90% del cemento obtenido bajo la relación cemento / árido 1:6, utilizando arena natural y cemento CEM I 52.5 R.

- CEM I AR 80/0: Probetas de mortero elaboradas con agua residual tratada, y con el 80% del cemento obtenido bajo la relación cemento / árido 1:6, utilizando arena natural y cemento CEM I 52.5 R.
- CEM I AP 100/0: Probetas de mortero elaboradas con agua potable, y con el 100% del cemento obtenido bajo la relación cemento / árido 1:6, utilizando arena natural y cemento CEM I 52.5 R.
- CEM I AP 90/0: Probetas de mortero elaboradas con agua potable, y con el 90% del cemento obtenido bajo la relación cemento / árido 1:6, utilizando arena natural y cemento CEM I 52.5 R.
- CEM I AP 80/0: Probetas de mortero elaboradas con agua potable, y con el 80% del cemento obtenido bajo la relación cemento / árido 1:6, utilizando arena natural y cemento CEM I 52.5 R.
- CEM II AR 100/0: Probetas de mortero elaboradas con agua residual tratada, y con el 100% del cemento obtenido bajo la relación cemento / árido 1:6, utilizando arena natural y cemento CEM II/B-L 32.5 N.
- CEM II AR 90/0: Probetas de mortero elaboradas con agua residual tratada, y con el 90% del cemento obtenido bajo la relación cemento / árido 1:6, utilizando arena natural y cemento CEM II/B-L 32.5 N.
- CEM II AR 80/0: Probetas de mortero elaboradas con agua residual tratada, y con el 80% del cemento obtenido bajo la relación cemento / árido 1:6, utilizando arena natural y cemento CEM II/B-L 32.5 N.
- CEM II AP 100/0: Probetas de mortero elaboradas con agua potable, y con el 100% del cemento obtenido bajo la relación cemento / árido 1:6, utilizando arena natural y cemento CEM II/B-L 32.5 N.
- CEM II AP 90/0: Probetas de mortero elaboradas con agua potable, y con el 90% del cemento obtenido bajo la relación cemento / árido 1:6, utilizando arena natural y cemento CEM II/B-L 32.5 N.

- CEM II 80/0 AP: Probetas de mortero elaboradas con agua residual potable, y con El 80% del cemento obtenido bajo la relación cemento / árido 1:6, utilizando arena natural y cemento CEM II/B-L 32.5 N.

4.2.7. Metodología de Ensayo

4.2.7.1. Ensayos realizados al agua residual tratada

4.2.7.1.1. Determinación del pH

La determinación del pH en aguas de amasado se realiza de acuerdo al procedimiento establecido en la norma UNE 83952, de modo tal que se pueda estimar este importante parámetro tanto para el agua de amasado y curado en morteros y hormigones, como para elementos que puedan estar en contacto con el hormigón endurecido, y así prever la potencial agresividad a la que pueda estar sujeta el hormigón o mortero en este caso, frente a una disolución ácida.

Fundamento del Método de ensayo

El método se basa en la medición del pH por diferencia de potencial, utilizando un pH-metro que contiene un electrodo de vidrio y otro de referencia. Previo a la medición sobre las muestras de agua residual tratada, se debe realizar una calibración del equipo con dos disoluciones patrón que tienen un pH conocido.



Figura 29: pH-metro con el correspondiente electrodo

Procedimiento Operatorio

En primer lugar se debe certificar la limpieza de los electrodos antes de proceder a su utilización. Luego de esto, se debe verificar la temperatura aproximada ambiental, la cual puede fijarse en el pH-metro antes de iniciar la calibración.

Tomando en consideración una temperatura de aproximadamente 25°C para la realización del ensayo, se preparan dos disoluciones patrón que servirán para realizar la calibración del equipo. Una de ellas será una solución de Potasio Hidrógeno Ftalato a 0,05 M de concentración, la cual tiene un pH esperado de 4,01. Además, se prepara otra solución de Potasio di-Hidrógeno Fosfato a 0,025 M y di-Sodio Hidrógeno Fosfato a 0,025 M, esperando que esta tenga un pH de 6,87.

También es factible la utilización de disoluciones tampón comerciales, siempre y cuando el fabricante declare el valor del pH con una apreciación de 0,05 unidades, definiendo además la variación del pH en función de la temperatura, así como los patrones de composición química. Este tipo de disoluciones se caracterizan por tener un pH muy estable frente a la adición de ácidos y bases, por cuanto tienen una confiabilidad importante dentro del proceso de calibración del equipo. En el caso de esta investigación, se han utilizado dos

disoluciones de este tipo para la calibración, cuyo pH es de 4,00 y 7,02 respectivamente, a una temperatura aproximada de 25°C.

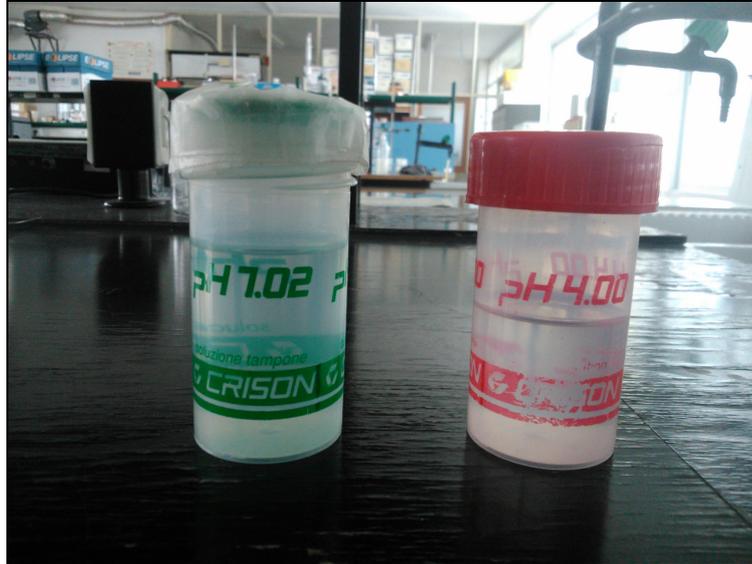


Figura 30: Disoluciones Tampón comerciales usadas en la fase de calibración

Una vez que se tienen precisadas las disoluciones, bien sean de tipo tampón o hechas en el laboratorio, se introduce el electrodo en el interior de la primera disolución sin tocar el fondo del recipiente, revolviendo el mismo suavemente mientras que la lectura del phmetro se estabiliza; este proceso puede tardar unos pocos segundos o prolongarse un poco más, por cuanto se debe ser paciente durante la calibración, y ante la operación con las muestras del agua de amasado.

Una vez que se estabiliza la lectura, y se chequea que efectivamente corresponde con el valor del pH que previamente se conocía, se procede a retirar el electrodo, y a lavar con agua destilada la superficie del mismo. A continuación se repite el procedimiento con la otra disolución, esperando que la lectura se estabilice y certificando que corresponda con el valor conocido.

Así finaliza la calibración; nuevamente se limpia el electrodo superficialmente con agua destilada, y se toman tres (3) muestras del agua de amasado en recipientes de vidrio. En cada una de las muestras se sumergirá el electrodo y se realizará el mismo procedimiento

descrito en la fase de calibración. Es de importancia que la diferencia entre dos lecturas sucesivas no difiera en más de 0,1 unidades de pH. El resultado será expresado con una cifra decimal.

4.2.7.1.2. Determinación del contenido de cloruros

El objetivo tras la realización de este ensayo es poder determinar el contenido de cloruros dentro del agua de amasado para morteros y hormigón estructural, pudiendo incluir dentro del parámetro reportado el contenido de bromuros, sulfuros y yoduros, como parte de los cloruros. El procedimiento se realiza de acuerdo a lo establecido en la norma UNE 7178:1960.

Fundamento del Método de ensayo

El procedimiento consiste en la valoración del ión cloruro con nitrato de plata, utilizando al cromato de potasio como indicador. Como se ha indicado en el párrafo anterior, esta valoración incluirá sulfuros, bromuros y yoduros.

Procedimiento Operatorio

En primer lugar se prepararán tres (3) muestras del agua de amasado, que servirán para realizar tres repeticiones del ensayo. Con la ayuda una pipeta, se toman 50ml de una muestra de agua, y se depositan en un vaso; esto constituye la primera muestra, por cuanto el mismo procedimiento será efectuado en tres (3) oportunidades.



Figura 31: Preparación de las muestras de ensayo

A los 50ml de agua, se le añade una pequeña cantidad de Cromato de Potasio, el cual servirá de indicador frente a la presencia del ión cloruro; inicialmente tornará la solución de color amarillo y sin turbidez alguna.



Figura 32: Cromato Potásico

Posteriormente, el vaso con la muestra se coloca bajo una bureta de 25cm³, sobre la que se agrega una solución de nitrato de plata al 0,025 N. A continuación, se realiza la apertura de

la bureta y de una forma lenta se deja caer gota a gota el nitrato de plata sobre la muestra de agua con presencia del indicador.

Poco a poco, el nitrato de plata comenzará a cambiar el color de la solución hacia un tono rojizo en forma puntual y no permanente en el tiempo, hasta llegar un punto en el que las gotas cambien de forma permanente el color de la solución hasta un tono similar al rosa y con turbidez.



Figura 33: Adición de la disolución de nitrato de plata

En ese punto se cierra la salida de la bureta y se estima la diferencia entre las lecturas inicial y final del nitrato de plata contenido en ella. En la medida en que haya sido requerido una mayor cantidad de nitrato de plata, se corresponde con una mayor cantidad de cloruros presentes en la muestra de agua.

La concentración en partes por millón del ión cloruro dentro de la muestra de agua se calcula mediante la siguiente expresión:

$$C = \frac{(V1 - V2) \times N \times 71000}{V}$$

Donde:

“C” es la concentración del ión cloruro en partes por millón.

“V1” es la lectura inicial de la bureta en cm^3 .

“V2” es la lectura final de la bureta en cm^3 .

“N” es la normalidad de la disolución valorada de Nitrato de Plata.

“V” es el volumen de la muestra de agua utilizada en el procedimiento.

4.2.7.1.3. Determinación del contenido de sustancias disueltas.

El procedimiento descrito a continuación se fundamenta en el contenido de la norma UNE 83957:2008, que tiene por objeto determinar el contenido del residuo seco dentro del agua destinada a la realización de amasadas de morteros y hormigones, al curado o al agua que eventualmente podría estar en contacto con elementos de hormigón endurecido, y que puedan causar una agresión química por procesos de lixiviación.

Fundamento del Método de Ensayo

La determinación del contenido de sustancias disueltas o residuos secos se realiza mediante evaporación y posterior secado a $105 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ de dos (2) muestras de agua. Por diferencia de peso se obtiene el contenido del residuo seco.

Procedimiento Operatorio

La fase que será descrita a continuación se repetirá en dos (2) oportunidades, para la obtención de tres valores representativos del ensayo. Lo primero que debe hacerse es obtener una muestra del agua de amasado y llenar 100 ml de agua con la ayuda de un matraz aforado. El contenido de este se vierte posteriormente sobre un recipiente, cuyo peso inicial ha sido previamente estimado en una balanza con una apreciación de 0,0001g.



Figura 34: Recipientes pesados en la balanza de cuatro decimales de precisión.

A continuación, y una vez precisados los tres recipientes correspondientes a las tres repeticiones, se procede a su colocación en el interior de un baño de arena, que consiste en una resistencia eléctrica capaz de emanar calor, el cual tiene forma de cajetón en cuyo interior se encuentra una capa de gravilla. Las tres muestras de agua se introducen dentro de la capa de arena y se dejan en el baño de arena durante dos días aproximadamente, o hasta que se evapore completamente toda el agua contenida en el interior de cada recipiente.



Figura 35: Baño de arena

Una vez chequeada la evaporación de toda el agua, se introducen los recipientes dentro de una estufa a 105 ± 5 °C durante una hora; una vez cumplido este tiempo, se retiran los recipientes de la estufa y se dejan enfriando en un desecador, evitando que estos puedan adquirir cierta humedad ambiental.



Figura 36: Detalle de los sólidos disueltos depositados en el fondo del recipiente

Luego, se pesan los recipientes con el precipitado de los sólidos disueltos en la balanza de precisión. Por diferencia con el peso inicial del recipiente se obtiene el peso de los residuos secos. La siguiente expresión permite la estimación de este parámetro en mg/l:

$$\text{Sólidos disueltos} = \frac{(m1 - m2) \times 1000}{V}$$

Donde:

“m1” corresponde al peso en miligramos del recipiente más los sólidos disueltos contenidos en él.

“m2” corresponde al peso en miligramos del recipiente, inicialmente determinado.

“V” representa el volumen de la muestra de agua en mililitros contenida en el recipiente.

4.2.7.1.4. Determinación del contenido de sulfatos

Para la estimación de este parámetro, se sigue el procedimiento establecido en la norma UNE 83956:2008, la cual tiene por objeto la determinación del contenido de ión sulfato contenido en las aguas destinadas al amasado de mezclas de mortero u hormigón estructural, o en las aguas que puedan estar en contacto con el hormigón endurecido y que eventualmente causen agresión química mediante la formación de compuestos expansivos que ocasionan el posterior deterioro del hormigón o mortero.

Fundamento del Método de Ensayo

El contenido de ión sulfato se obtendrá en forma gravimétrica, mediante la formación de precipitado a un pH contenido entre 1,0 y 5,0, con el uso de una disolución de Cloruro de Bario, añadida durante la ebullición de la muestra de agua destinada al amasado.

Procedimiento Operatorio

Se efectuarán tres (3) repeticiones del ensayo, por cuanto las fases que a continuación serán descritas, tendrán aplicabilidad en cada una de las repeticiones. En primer lugar, se debe

tomar un volumen de muestra de 100 ml con la ayuda de un matraz aforado, y depositar su contenido en un recipiente.

Posteriormente, se añaden gotas de Naranja de Metilo, el cual es un indicador de un pH ácido. Las primeras gotas ocasionan un cambio de color en la muestra de agua en torno al amarillo sin turbiedad; en la medida en que se añaden más gotas el color se tornará rosa intenso, indicando la presencia de un pH ácido. En este momento, no se añade más indicador y se procede a la adición de 2ml de Ácido Clorhídrico.



Figura 37: Aspecto de la muestra de agua tras la primera adición de gotas de naranja de metilo



Figura 38: Aspecto de la muestra una vez que el pH es más ácido

Realizado este procedimiento con las tres (3) muestras, se completan los recipientes hasta un volumen de 200ml y se calientan en una estufa lentamente hasta que comience la ebullición de la disolución; en este momento se cuentan 15 minutos, y al final de este período se retira la muestra, chequeando que no tengan turbidez alguna.

De existir turbidez en la muestra, se filtra la disolución por un papel filtro, lavando el mismo con agua destilada y depositando el contenido en un recipiente, el cual se someterá nuevamente a ebullición durante al menos 5 minutos; si al finalizar este tiempo, el chequeo de la muestra evidencia presencia de turbidez, se finaliza el ensayo y se repite el procedimiento con otra muestra. En caso contrario, o en el supuesto que inicialmente no tuviera presencia de materias insolubles, se continúa con el siguiente paso, que se describe a continuación.

Las muestras se dejan reposando en el horno por un período de entre 12 y 24 horas, para proceder luego a la fase de filtrado. Se prepara previamente un matraz Kitasato con un embudo en su parte superior, y conectado a una bomba de vacío para agilizar la fase de filtrado. Se coloca además un papel de Filtro de dimensiones y peso conocido sobre el embudo.



Figura 39: Matraz con embudo y conectado a bomba de vacío



Figura 40: Papel de filtro de dimensiones y peso conocido

A continuación, se toma la muestra de agua que había estado en reposo previamente, y se vierte su contenido sobre el embudo; luego se realiza un llenado del recipiente que contenía la muestra con agua destilada, vertiendo su contenido sobre el embudo para garantizar el

filtrado de todos los sulfatos presentes en la muestra. Se recomienda repetir el enjuague con agua destilada en varias oportunidades.

Se debe garantizar que la muestra vertida no contenga el cloruro de Bario que se añadió en la fase anterior para permitir el precipitado de los sulfatos, por lo que se realiza el despistaje de cloruros con el uso de una disolución de Nitrato de Plata. El proceso consiste en tomar el embudo del matraz durante uno de los vertidos con agua destilada, y colocar un tubo de ensayo bajo el embudo; sobre este será vertido parte del contenido, al que se añadirán a continuación una (1) o dos (2) gotas de nitrato de Plata. Si el contenido del tubo de ensayo se torna blanquecino, indica la presencia de cloruros, en cuyo caso se debe seguir continuando con la fase de filtrado, hasta realizar nuevamente un ensayo de despistaje con Nitrato de Plata y chequear que el contenido de la muestra dentro del tubo de ensayo sea cristalino.



Figura 41: Contraste entre dos muestras, la de la izquierda tiene un tono blanquecino, indicador de presencia de cloruros

Lo que se realiza a continuación es la fase de calcinación. Se retiran los filtros de cada una de las muestras, y se colocan dentro de crisoles de porcelana, uno para cada muestra. Estos crisoles se han sometido previamente a un calentamiento a 550°C durante media hora, y

dejados enfriar en un desecador, luego de esto se ha estimado su peso inicial en una balanza con una precisión de 0,0001 g.



Figura 42: Disposición de los crisoles en el interior del horno

Los crisoles con el papel filtro se someten a una rampa de calentamiento dentro de un horno, que a continuación se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 10: Rampa de calcinación

FASE ESCALONADA DE CALCINACIÓN	
Tiempo (minutos)	Temperatura (°C)
10	200
10	250
20	300
10	350
10	450
10	550
10	650
15	950

Una vez que superada la fase de calcinación, se retiran los crisoles del horno, se pesan y por diferencia se obtiene el contenido de sulfatos mediante la siguiente expresión:

$$SO_4^{-2} = (m1 - m2 - m3) \times 4116$$

Donde:

“m1” es el peso del crisol con los sulfatos en gramos, una vez finalizada la calcinación.

“m2” es el peso del crisol en gramos.

“m3” es el peso en gramos de las cenizas del filtro calcinado, cuya densidad y porcentaje de cenizas es conocido.

El resultado obtenido se expresa en miligramos por litro (mg/l).

4.2.7.2. Ensayos realizados a los áridos

4.2.7.2.1. Granulometría

El objetivo de este ensayo es la determinación de la curva granulométrica del árido, que representa a simple vista la distribución porcentual de los diferentes tamaños de partículas presentes en el material.

El procedimiento del ensayo comprende en primer lugar la toma de una cantidad de material de las bolsas en las que fue almacenado luego de la operación de cuarteo. Posteriormente, mediante el uso de unos tamices normalizados, se hace pasar la muestra por los diferentes cedazos, en orden decreciente, de 4mm, 2mm, 1mm, 0,50mm, 0,25mm y 0,125mm.

La operación de tamizado puede hacerse en forma manual, revolviendo con las manos suavemente el material en cada tamiz, o mediante el apoyo de una base vibratoria accionada por un mecanismo eléctrico que facilita y mejora el rendimiento de proceso de tamizado.



Figura 43: Tamices utilizados para el ensayo

El material que queda retenido en cada tamiz es llevado a la estufa, donde es secado durante al menos 24 horas, para que no tenga humedad al momento de realizar las amasadas y así evitar hacer correcciones sobre la dosificación inicial planteada.

La forma de expresar los resultados es mediante una gráfica en cuyo eje de las abscisas esté representado en escala logarítmica el diámetro del cedazo, mientras que en el eje de las ordenadas se muestra el porcentaje pasante en cada cedazo.

El porcentaje retenido en cada tamiz se expresa en función de la masa total, en consecuencia:

$$\% \text{ retenido} = \frac{\text{Peso Retenido (g)}}{\text{Peso total de la muestra (g)}} \times 100$$

Y el porcentaje pasante a representar en la gráfica será

$$\% \text{ Pasante} = 100 - \% \text{ retenido acumulado}$$

4.2.7.2.2. Densidad y absorción de agua

El procedimiento para la determinación de la densidad y la absorción de agua por parte de los áridos se realiza de acuerdo al procedimiento descrito en la norma UNE-EN 1097-6. “Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua”.

El método que se debe utilizar para este ensayo es el del picnómetro para partículas de árido comprendidas entre 0,063 y 4 mm. La masa de la muestra de árido, deberá ser superior o igual a 1 kg. Ésta se lava en un tamiz de 0,063 mm (para eliminar las partículas más finas) y de 4 mm, de tal manera que se rechazan las que quedan retenidas en él al igual que en el caso del ensayo para la determinación de la curva granulométrica.

La muestra de ensayo preparada se sumerge en agua a 22 ± 3 °C en el picnómetro y se eliminan las burbujas de aire balanceando y dando ligeros golpes a éste en posición inclinada. Se mantiene en el baño María durante aproximadamente 24 horas. Al finalizar este tiempo, se retira y se vuelven a eliminar las burbujas de aire. A continuación, se coloca la tapa en la parte superior del picnómetro y se rellena con agua hasta la señal. Tras ello, se seca el exterior y se pesa.

Se decanta el agua y se vacía el picnómetro en una bandeja. Se vuelve a colocar la tapa en la parte superior del picnómetro y se rellena con agua hasta la señal. Tras ello, se seca el exterior y se pesa. Posteriormente, se realiza el escurrido de la muestra sobre el tamiz 0,063 mm, obteniendo la muestra de ensayo ya escurrida. Luego el material es extendido en una capa uniforme sobre el fondo de la bandeja. Se expone el árido a una corriente suave de aire caliente para evaporar la humedad de la superficie, mientras que a intervalos frecuentes se agita para asegurar un secado uniforme, hasta que las partículas de árido ya no se adhieran entre sí.

La idea es alcanzar un estado de material saturado pero con superficie seca; para estimar si se ha llegado a este estado, se sujeta el molde cónico metálico con su diámetro mayor hacia

abajo sobre el fondo de la bandeja. Se rellena con parte de la muestra de ensayo utilizando una espátula y se emplea el pisón para apelmazar ligeramente la superficie 25 veces, a través del orificio de la parte superior del molde. A continuación, se eleva el molde; si el cono de árido no se desmorona, se continúa el secado y se repite la prueba hasta que se produzca el desmoronamiento al retirar el molde.

Para finalizar se pesa la muestra saturada con superficie seca. Por último, se seca el árido en una estufa ventilada a una temperatura de 110 ± 5 °C hasta masa constante (unas 24 horas) y se pesa.

La expresión para el cálculo de la densidad es la que sigue a continuación:

$$\rho = \frac{M4}{M1 - (M2 - M3)}$$

Donde

“M1” es la masa del árido saturado con la superficie seca.

“M2” es la masa del picnómetro con la muestra de ensayo, lleno de agua hasta la señal.

“M3” es la masa del picnómetro relleno únicamente de agua hasta la señal.

“M4” es la masa de la muestra de ensayo secada en estufa.

El resultado se expresa en g/cm^3 .

La expresión para el cálculo de la absorción se muestra a continuación:

$$\text{Absorción} = \frac{M1 - M4}{M4} \times 100$$

“M1” es la masa del árido saturado con la superficie seca.

“M4” es la masa de la muestra de ensayo secada en estufa.

El resultado se expresa en porcentaje.

4.2.7.3. Ensayos realizados a los morteros endurecidos

4.2.7.3.1. Ensayo de resistencia a flexión y a compresión

Para determinar la resistencia a flexión y compresión del mortero endurecido se sigue el procedimiento establecido en la norma UNE-EN 1015-11 denominada “Método de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y compresión del mortero endurecido”.

Para la determinación de la resistencia a flexión y a compresión se utiliza una máquina de ensayos de tipo hidráulico que aplica una fuerza sobre las probetas hasta que estas alcanzan la rotura. Existe sincronismo entre la máquina y un sistema de lectura y control que permite, mediante el uso de un ordenador, la lectura y almacenamiento de los datos medidos.



Figura 44: Máquina de ensayo de resistencia a flexión y compresión

En el caso del ensayo de resistencia a flexión, la fuerza se aplica en el punto medio de la probeta, generándose dos reacciones en los apoyos sobre los que se ha puesto esta. La fuerza se aplica hasta alcanzar la rotura.

Luego, las dos mitades de cada probeta que resultan de la rotura inicial, se someten a un ensayo a compresión, fuerza que en este caso se aplica de manera uniforme sobre la superficie de la probeta.

Los valores de fuerza se miden en kilo Newton (kN) y los esfuerzos en mega Pascal (MPa). Una vez realizados los ensayos, las muestras se introducen en la estufa para estimar la humedad..

4.2.7.3.2. Ensayo de Retracción

El ensayo de retracción busca estimar la contracción o expansión sufrida por la probeta de mortero con el paso del tiempo. El procedimiento se realiza de acuerdo al procedimiento de ensayo descrito en la norma UNE 83831 EX, “Métodos de ensayo de los morteros para albañilería endurecidos: Determinación de la estabilidad dimensional de los morteros para albañilería endurecidos, Octubre 2009.

Para la realización del ensayo se requiere la preparación de tres (3) probetas en unos moldes con condiciones particulares, de iguales dimensiones que los utilizados para el ensayo de flexión y compresión, pero con unos orificios circulares en las caras laterales de la sección de 40x40 mm, donde es posible introducir unos pernos roscados, de modo tal que queden embutidos dentro de la probeta de ensayo.



Figura 45: Probetas en cámara para el ensayo de retracción

Estas probetas se desmoldan tras dos (2) días de curado, cada una de ellas se denomina con la nomenclatura X, Y y Z, y se procede a medir tanto su longitud como a determinar su peso.

Posteriormente, se conservan en la cámara a una temperatura de 20 ± 2 °C y a una humedad relativa de $65 \pm 5\%$, hasta que se procede al inicio de las lecturas a los 7, 14 y 28 días de curado. En cada lectura se procede a medir la longitud de la probeta utilizando un comparador de longitudes, así como la estimación de su peso, estimando por medio de las siguientes expresiones las variaciones de ambos parámetros:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \times 100$$

$$m = \frac{\Delta M}{M} \times 100$$

Donde

“ ϵ ” es el cambio porcentual de longitud de la probeta.

“ ΔL ” es la diferencia de longitud respecto a la medida inicial.

“ L ” es la longitud inicial de la probeta.

“ m ” es el cambio porcentual del peso de la probeta.

“ ΔM ” es la diferencia de peso con respecto a la lectura inicial.

“ M ” es el peso inicial.



Figura 46: Probeta sometida a la lectura de la longitud

4.2.7.3.3. Ensayo de determinación del coeficiente de permeabilidad al vapor de agua

La realización de este ensayo se fundamenta en la Norma UNE-EN 1015-19. “Métodos de ensayo para los morteros de albañilería. Parte 19: Determinación de la permeabilidad para los morteros de revoco y enlucido”

El método se fundamenta en el sello de la embocadura de los recipientes donde son colocadas las probetas; estos recipientes poseen una presión de vapor de agua controlada en su interior con el uso de una disolución salina saturada de Nitrato de Potasio. Las probetas se someten a un ambiente con temperatura y humedad controlada, donde la presión de vapor de agua difiere de la presente en el interior de los recipientes, por cuanto la velocidad de transferencia de humedad es determinada por la variación del peso de los recipientes.

Las probetas son realizadas aplicando el mortero sobre una placa de hormigón celular, con una densidad de aproximadamente $550 \pm 50 \text{ kg/m}^3$. Antes de su aplicación es importante colocar dos capas de algodón sobre esta placa. Las probetas de mortero deben tener un diámetro de aproximadamente 16 cm, de modo tal que quepan dentro del recipiente, pero que facilite las labores de sellado. Las probetas se introducen dentro de una cámara de conservación con una temperatura de $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ y a una humedad relativa de $95 \pm 5\%$ durante dos (2) días.



Figura 47: Preparación de las probetas de ensayo

Transcurrido este lapso, las probetas se introducen dentro de los recipientes circulares, midiendo previamente su espesor y tomando en cuenta la presencia en el interior del recipiente de la disolución salina saturada de nitrato de potasio, y dejando una capa de aire de 10 ± 5 mm de espesor entre la cara inferior de la probeta y la superficie de la disolución. Luego de esto, se sellan los bordes con una junta de estanqueidad apropiada.



Figura 48: Peso de una de las probetas dentro del recipiente

Los recipientes luego se conservan a una temperatura de 20 ± 2 °C y a una humedad relativa de $50 \pm 5\%$. Luego se pesan los recipientes a tres intervalos de tiempo diarios distribuidos a lo largo del día, y representando gráficamente la variación del peso a lo largo del tiempo. Si los tres puntos se pueden colocar en línea recta, hace referencia al hecho que la cantidad de vapor de agua que atraviesa la probeta por unidad de tiempo es constante.

Una vez realizada la gráfica, se procede a estimar el flujo de vapor de agua $\Delta G / \Delta T$ que representa la pendiente de la gráfica. Seguidamente, se puede calcular la permeanza al vapor de agua por medio de la siguiente expresión:

$$\Lambda = \frac{1}{A \Delta p / (\Delta G / \Delta t) - R_A},$$

Donde

“ Λ ” es la permeanza al vapor de agua, en $\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$

“ A ” es el área en m^2 de la embocadura del recipiente del ensayo, aproximadamente $0,02\text{m}^2$.

“ $\Delta G/\Delta T$ ” es el flujo de vapor de agua, en kg/s .

“ R_A ” es la resistencia a la difusión del vapor de agua de la lámina de aire existente entre la cara inferior de la probeta y la disolución salina ($0,048 \times 10^9 \text{ Pa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s} / \text{kg}$).

Al multiplicar la permeanza al vapor de agua por el espesor medio de la probeta, se podrá estimar la permeabilidad del vapor de agua, en $\text{kg} \cdot \text{m} / \text{m}^3 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$.

4.2.7.3.4. Ensayo de determinación de la resistencia a la adhesión

La resistencia a la adherencia en los morteros se determina de acuerdo al procedimiento establecido en la norma UNE-EN 1015-12 “Métodos de ensayo para morteros de albañilería. Parte 12: Determinación de la resistencia de adhesión para los morteros de revoco y enlucido endurecidos aplicados sobre soportes”.

La resistencia a la adherencia se determina mediante la aplicación de una carga directa perpendicular a la superficie de una probeta de mortero. La tracción se aplica sobre una pastilla metálica que se encuentra pegada a la superficie del mortero. Esta resistencia depende de la carga aplicada y del área de la superficie de aplicación.

Las probetas deben tener un diámetro aproximado de 50 mm, realizando en este caso cinco (5) probetas para cada amasada. Luego se disponen durante 28 días en la cámara de conservación a una temperatura de $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ y a una humedad relativa de $65 \pm 5\%$



Figura 49: Preparación de las probetas de ensayo

Transcurrido este tiempo, se pegan las pastillas sobre la superficie del mortero, evitando el desbordamiento del adhesivo por los bordes. Se deja que se adhiera durante al menos 24 horas para proceder a realizar el ensayo con un equipo de tracción directa. La carga debe ser aplicada sin sacudidas y con una velocidad de aplicación uniforme que permita una rotura entre los 20s y los 60s. Por ello la velocidad de aplicación suele estar entre $0,003 \text{ (N/mm}^2\text{) x s}$ a $0,100 \text{ (N/mm}^2\text{) x s}$.

De presentarse una rotura entre el adhesivo y el mortero, se elimina el ensayo. Para el resto de los casos, se estimará la resistencia a la adhesión con la siguiente expresión:

$$f_u = \frac{F_u}{A}$$

Donde

“ f_u ” es la resistencia a la adherencia en N/mm^2 .

“ F_u ” es la carga de rotura a tracción en N.

“ A ” es el área de la probeta de ensayo en mm^2 .

5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1. Parámetros de calidad del agua de amasado

La instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 establece en su artículo 27 los valores admisibles de un conjunto de parámetros químicos, cuyos ensayos para su determinación fueron realizados sobre muestras de agua de la Estación Depuradora de Aguas Residuales (E.D.A.R.) de la localidad de Villaviciosa, provincia de Córdoba; estos resultados se mostrarán en los apartados siguientes. A continuación se presenta una tabla con los valores admisibles:

Tabla 11: Valores admisibles de parámetros químicos para el agua de amasado

Parámetro	Valores admisibles
pH	≥ 5
Sólidos Disueltos Residuos secos	$\leq 15 \text{ g/l (15.000 p.p.m)}$
ión Cloruro	$\leq 1 \text{ g/l (1000 p.p.m.)}$
ión Sulfato	$\leq 1 \text{ g/l (1000 p.p.m.)}$

5.1.1. Determinación del pH

El pH se ha estimado para muestras de agua residual tratada de la Estación Depuradora de Aguas Residuales del poblado de Villaviciosa, provincia de Córdoba, España. A continuación se presentan los resultados de las muestras:

Tabla 12: Valores de pH de la muestra de agua residual

MUESTRA	VALOR DE pH
1	7,0
2	6,9
3	6,8

En conclusión, el valor de pH para la muestra de agua de la E.D.A.R. de Villaviciosa es de 6,9 unidades, cumpliendo con el parámetro mínimo establecido en el artículo 27 de la instrucción de hormigón estructural EHE-08.

5.1.2. Determinación del contenido de cloruros

La concentración del ión cloruro es posible estimarla con la siguiente expresión:

$$C = \frac{(V1 - V2) \times N \times 71000}{V}$$

La tabla que se muestra a continuación presenta los resultados obtenidos para las tres (3) repeticiones de la muestra de agua de la E.D.A.R. de Villaviciosa.

Volumen "V": 50cm³

Normalidad del Nitrato de Plata "N": 0,03 N

Tabla 13: Concentraciones del ión cloruro en las muestras de agua residual

MUESTRA	V1 – V2 (cm³)	C (p.p.m.)
1	1,0	43
2	1,0	43
3	0,9	38

La muestra de agua de la E.D.A.R. de Villaviciosa tiene en promedio una concentración de 41 partes por millón, cumpliendo con los requisitos del artículo 27 de la Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08.

5.1.3. Determinación del contenido de sustancias disueltas

El contenido de sólidos disueltos se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\text{Sólidos disueltos} = \frac{(m1 - m2) \times 1000}{V}$$

Volumen “V”: 100 ml

Tabla 14: Sustancias disueltas contenidas en las muestras de agua residual

MUESTRA	m1 (mg)	m2 (mg)	Residuos secos (mg/l)
1	46332,9	46298,6	343
2	49591,1	49557,1	340

La muestra de agua de la E.D.A.R. de Villaviciosa tiene un contenido de sólidos disueltos de aproximadamente 347 mg/l, cumpliendo con el valor máximo admisible establecido en la instrucción de hormigón estructural EHE-08.

5.1.4. Determinación del contenido de sulfatos

La concentración de sulfatos en mg/l se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$SO_4^{-2} = (m1 - m2 - m3) \times 4116$$

La tabla adjunta muestra los resultados obtenidos

Peso de las cenizas del papel filtro “m3”: 0,09817 mg

Tabla 15: Contenido de sulfatos de las muestras de agua residual

MUESTRA	m1 (g)	m2 (g)	Sulfatos (mg/l)
1	22,3295	22,3174	49
2	21,2001	21,1892	44
3	22,3511	22,3409	42

La muestra de agua de la E.D.A.R. de Villaviciosa, tiene en promedio 45 mg/l de Sulfatos, cumpliendo con los valores máximos admisibles establecidos en la Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08.

5.2. Caracterización del árido natural

5.2.1. Granulometría

La determinación de la curva granulométrica se realizó de acuerdo a lo indicado en la Norma UNE 993-2, tomando en cuenta el material pasante por el tamiz de 4mm de abertura y realizando dos (2) repeticiones del ensayo, adoptando los valores medios. A continuación se presentan los resultados obtenidos:

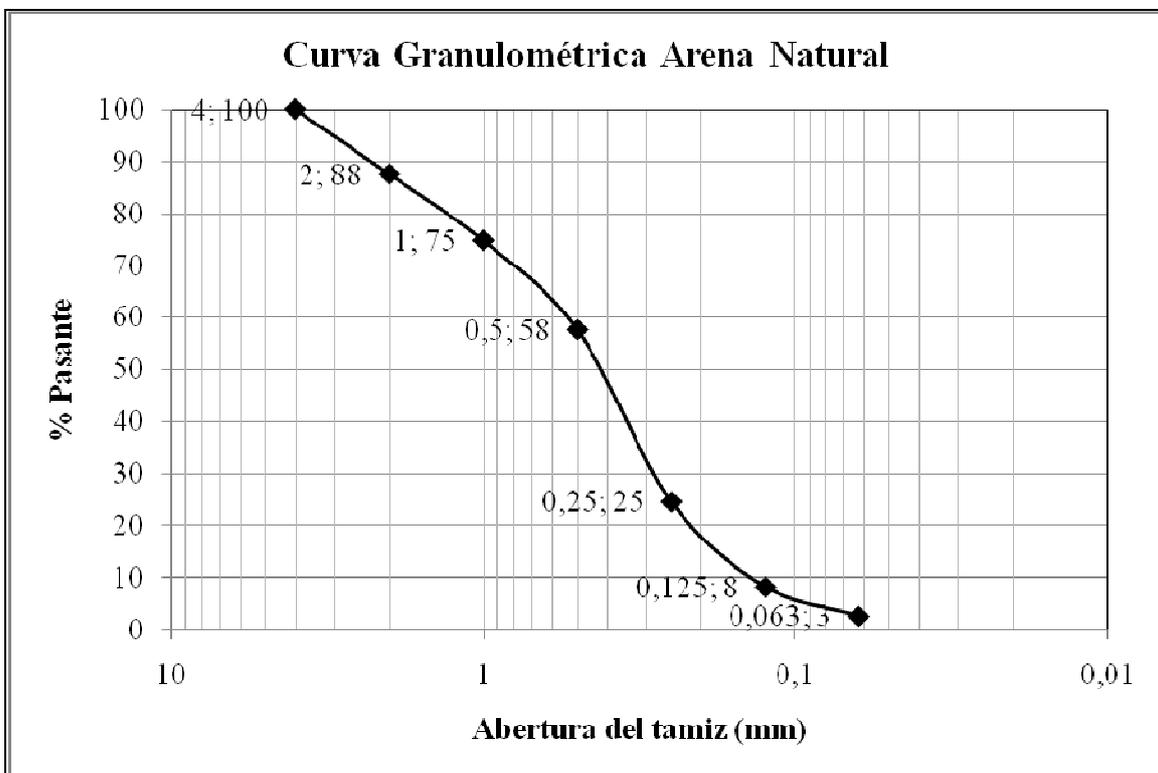


Figura 50: Curva Granulométrica de la arena natural

5.2.2. Densidad y Absorción

La determinación de la densidad y absorción de la arena natural se realizó de acuerdo al procedimiento establecido en la norma UNE-EN 1097-6. La tabla que se muestra a continuación presenta un resumen de los resultados:

Tabla 16: Resultados de densidad y absorción de la arena natural

Masa del árido sacado del picnómetro y escurrido (g)	M1 =	1.042
Masa del Picnómetro con agua y árido (g)	M2 =	4.185
Masa del Picnómetro sólo con agua(g)	M3 =	3.534
Masa seca (después de la estufa) (g)	M4 =	1.038
DENSIDAD APARENTE DE PARTÍCULAS(g/cm3)	$\rho_a =$	2,682
DENSIDAD DE PARTÍCULAS TRAS SECADO EN ESTUFA (g/cm3)	$\rho_{rd} =$	2,655
DENSIDAD DE PARTÍCULAS SATURADAS CON LA SUPERFICIE SECA (g/cm3)	$\rho_{ssd} =$	2,665
ABSORCIÓN DE AGUA (%)	$WA_{24} =$	0,385

5.3. Caracterización del árido reciclado

5.3.1. Granulometría

La determinación de la curva granulométrica se realizó de acuerdo a lo indicado en la Norma UNE-EN 993-1, tomando en cuenta el material pasante por el tamiz de 4mm de abertura y realizando dos (2) repeticiones del ensayo, adoptando los valores medios. La curva granulométrica se muestra a continuación:

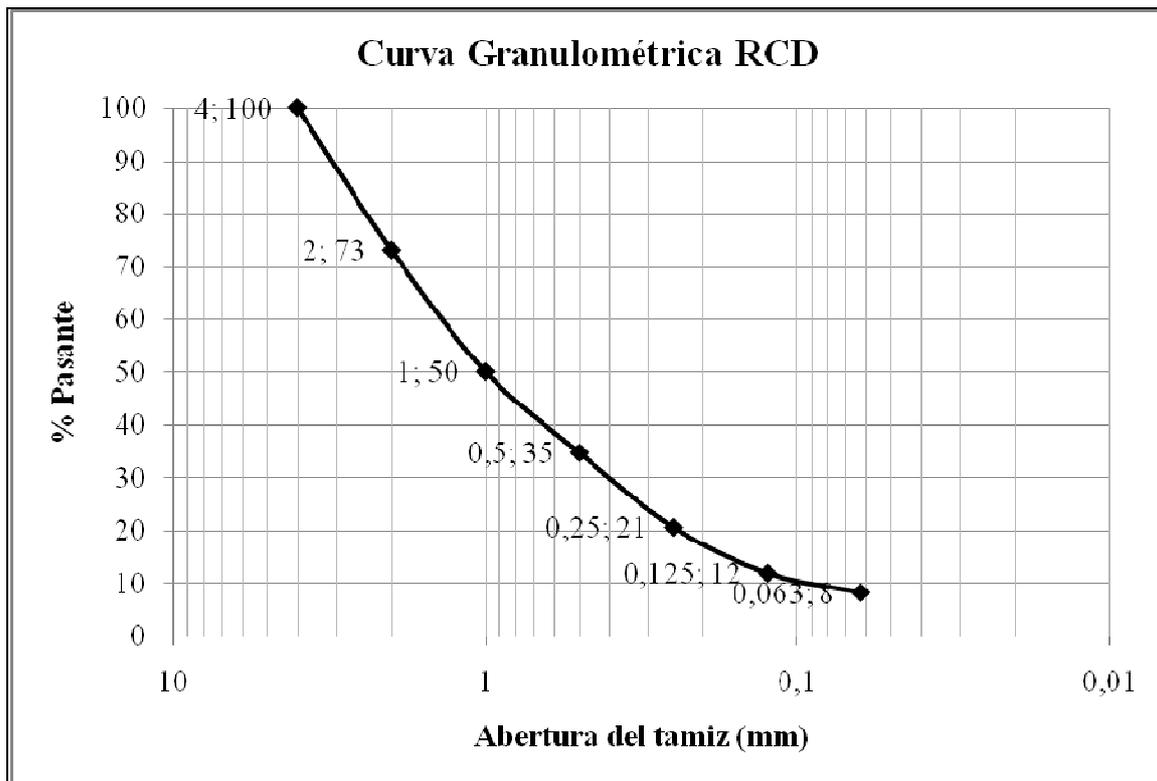


Figura 51: Curva Granulométrica del R.C.D.

5.3.2. Densidad y Absorción del árido reciclado

La determinación de la densidad y absorción de la arena natural se realizó de acuerdo al procedimiento establecido en la norma UNE-EN 1097-6. En este caso se realizaron dos repeticiones del ensayo, obteniendo un valor medio. La tabla que se muestra a continuación presenta un resumen de los resultados:

Tabla 17: Primera repetición del ensayo de absorción y densidad del R.C.D.

Masa del árido sacado del picnómetro y escurrido (g)	M1 =	982
Masa del Picnómetro con agua y árido (g)	M2 =	4.124
Masa del Picnómetro sólo con agua(g)	M3 =	3.535
Masa seca (después de la estufa) (g)	M4 =	944
DENSIDAD APARENTE DE PARTÍCULAS(g/cm3)	$\rho_a =$	2,659
DENSIDAD DE PARTÍCULAS TRAS SECADO EN ESTUFA (g/cm3)	$\rho_{rd} =$	2,402
DENSIDAD DE PARTÍCULAS SATURADAS CON LA SUPERFICIE SECA (g/cm3)	$\rho_{ssd} =$	2,499
ABSORCIÓN DE AGUA (%)	$WA_{24} =$	4,025

Tabla 18: Segunda repetición del ensayo de absorción y densidad del R.C.D.

Masa del árido sacado del picnómetro y escurrido (g)	M1 =	1.064
Masa del Picnómetro con agua y árido (g)	M2 =	4.181
Masa del Picnómetro sólo con agua(g)	M3 =	3.535
Masa seca (después de la estufa) (g)	M4 =	1.029
DENSIDAD APARENTE DE PARTÍCULAS(g/cm ³)	$\rho_a =$	2,687
DENSIDAD DE PARTÍCULAS TRAS SECADO EN ESTUFA (g/cm³)	$\rho_{rd} =$	2,462
DENSIDAD DE PARTÍCULAS SATURADAS CON LA SUPERFICIE SECA (g/cm ³)	$\rho_{ssd} =$	2,545
ABSORCIÓN DE AGUA (%)	$WA_{24} =$	3,401

Luego de haber realizado las dos repeticiones del ensayo, se adopta una densidad de 2,432 g/cm³ y una absorción de 3,71 % para el R.C.D, correspondiente al valor medio de los resultados obtenidos.

Tras la obtención del parámetro, se puede notar la elevada absorción que tiene el árido reciclado en comparación con la arena natural, influyendo en la trabajabilidad de la mezcla, tendiendo a requerir una mayor cantidad de agua para poder asegurar una consistencia adecuada, que facilite la puesta en obra.

5.4. Resistencia a Flexión del Mortero Endurecido

5.4.1. Efecto de las Cenizas volantes de biomasa en la resistencia a flexión del mortero endurecido

5.4.1.1. Probetas con arena natural

A continuación se presentan los resultados obtenidos de resistencia a flexión de las diferentes probetas a dos edades de ensayo (7 días y 28 días).

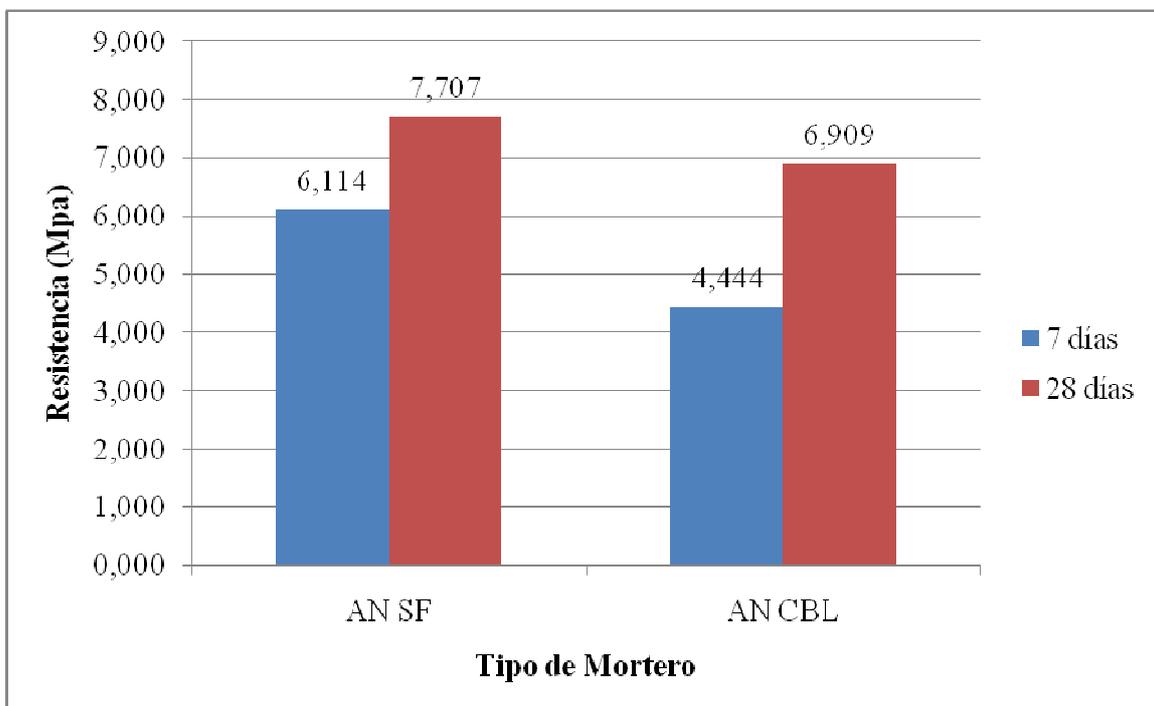


Figura 52: Resistencia a flexión de probetas elaboradas con arena natural, utilizando filler silíceo en el primer caso, y cenizas volantes de biomasa como sustituto en el segundo caso.

Tabla 19: Resumen estadístico de los datos presentados en la figura

Tipo de Mortero		Promedio (MPa)	Desviación Estándar (MPa)	Mínimo (MPa)	Máximo (MPa)
AN SF	7 días	5,523	0,522	5,125	6,114
	28 días	6,659	0,609	6,065	7,707
AN CBL	7 días	4,095	0,306	3,871	4,444
	28 días	5,926	0,596	5,210	6,909

Como se puede apreciar en la gráfica, la resistencia a flexión de los morteros con arena natural decrece al sustituir el filler silíceo por las cenizas volantes de biomasa, hecho que resulta un poco más notorio a los 7 días, donde las probetas con cenizas volantes tienen aproximadamente el 72% de la resistencia alcanzada con las probetas que incorporan filler silíceo, mientras que a los 28 estas probetas cuentan con casi el 90% de la resistencia alcanzada por las probetas que incorporan el filler silíceo.

Sin embargo, y a partir del punto anterior, la ganancia de resistencia en el tiempo es mayor en las probetas con cenizas volantes de biomasa, las cuales tienen un incremento de resistencia de aproximadamente 64% entre los ensayos a la primera semana y a la cuarta de haber sido elaboradas.

5.4.1.2. Probetas con R.C.D.

El siguiente gráfico muestra los resultados obtenidos para las probetas en las que fue usado Residuos de Construcción y Demolición como árido.

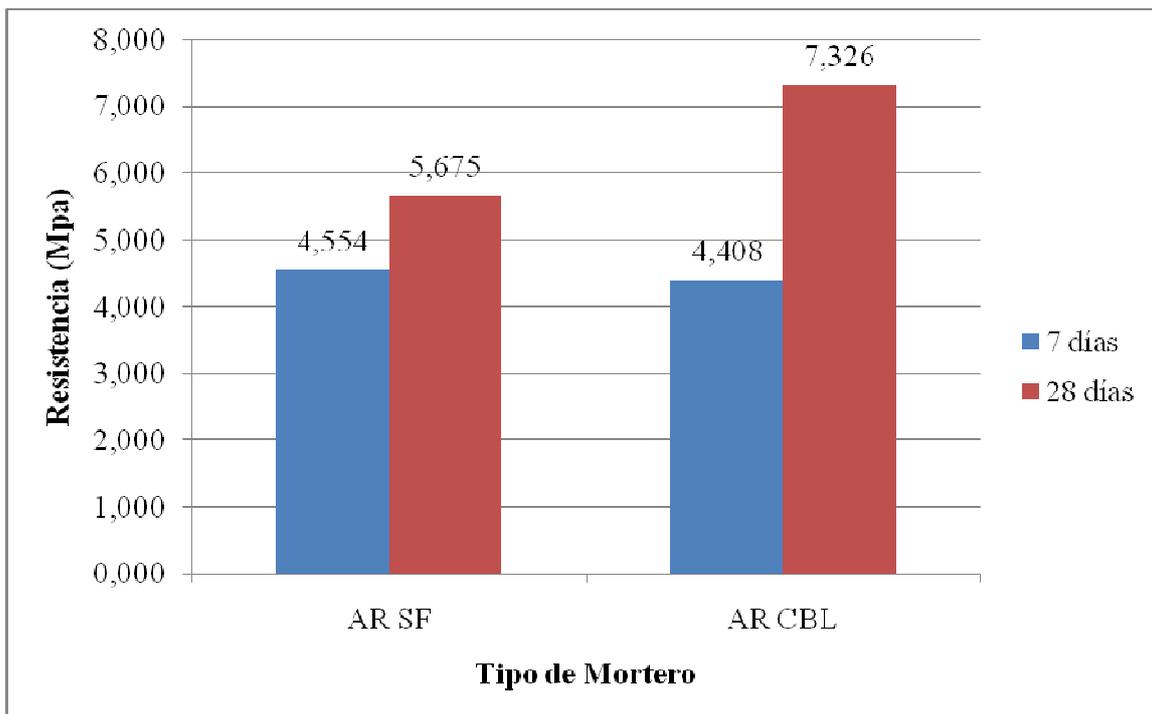


Figura 53: Resistencia a flexión de probetas elaboradas con árido reciclado, utilizando filler silíceo en el primer caso, y cenizas volantes de biomasa como sustituto en el segundo caso.

Tabla 20: Resumen estadístico de los datos presentados en la figura

Tipo de Mortero		Promedio (MPa)	Desviación Estándar (Mpa)	Mínimo (Mpa)	Máximo (Mpa)
AR SF	7 días	4,367	0,227	4,114	4,554
	28 días	5,273	0,391	4,549	5,675
AR CBL	7 días	4,408	0,580	4,018	5,074
	28 días	6,972	0,378	6,299	7,326

En el caso del uso de árido reciclado, surge un efecto contrario al de las probetas que incorporan arena natural en cuanto al efecto de las cenizas, que podría catalogarse como positivo en este caso, obteniendo resistencias superiores a las de las mezclas con filler

silíceo a los 28 días, mientras que a edades tempranas (7 días), la resistencia es muy similar en ambos casos.

Se reafirma además la rápida evolución de las resistencias en las probetas que incorporan cenizas volantes de biomasa, ya que tienen entre la primera y cuarta semana una ganancia de resistencia a flexión de aproximadamente 60%.

5.4.2. Efecto de la incorporación del agua residual en las mezclas de amasado

5.4.2.1. Probetas elaboradas con Cemento CEM I 52.5 R

A continuación se presentan los resultados obtenidos de las resistencias a flexión de las probetas con diferentes porcentajes de cemento, comparando con probetas de referencia elaboradas con agua potable.

Tabla 21: Resistencias a flexión obtenidas para probetas elaboradas con agua potable y cemento CEM I 52.5 R

CEM I FLEXIÓN AGUA POTABLE				
Tipo de Mortero	Promedio (Mpa)	Desviación Estándar (Mpa)	Mínimo (Mpa)	Máximo (Mpa)
CEM I AP 80/0	3,956	0,320	3,591	4,189
CEM I AP 90/0	4,962	0,231	4,696	5,114
CEM I AP 100/0	4,965	0,320	4,633	5,271

Tabla 22: Resistencias a flexión obtenidas para probetas elaboradas con agua residual y cemento CEM I 52.5 R

CEM I FLEXIÓN AGUA RESIDUAL				
Tipo de Mortero	Promedio (Mpa)	Desviación Estándar (Mpa)	Mínimo (Mpa)	Máximo (Mpa)
CEM I AR 80/0	3,908	0,170	3,726	4,062
CEM I AR 90/0	4,449	0,341	4,118	4,799
CEM I AR 100/0	5,023	0,186	4,865	5,228

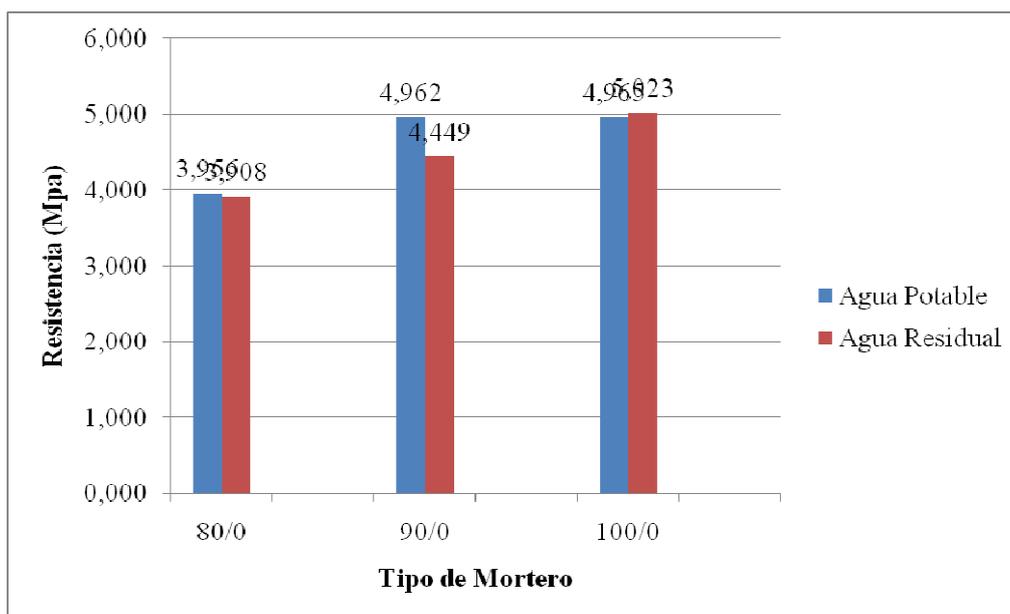


Figura 54: Comparación entre valores obtenidos con probetas de agua residual y agua potable, variando el porcentaje de cemento contenido.

De esta gráfica se puede concluir que en la medida que el contenido de cemento aumenta, las resistencias obtenidas son mayores tanto para las probetas con agua residual, como en

aquellas que tienen agua potable. En general se aprecia mucha similitud entre los valores obtenidos usando ambos tipos de agua en las amasadas, por cuanto pareciera no existir influencia alguna del agua residual en las resistencias obtenidas, las cuales se encontraron cercanas a 4 Mpa para el 80% de contenido de cemento, mientras que para las probetas con 100% del contenido de cemento, se obtuvieron valores muy cercanos a 5 MPa.

5.4.2.2. Probetas elaboradas con Cemento CEM II/B-L 32.5N

A continuación se presentan los resultados obtenidos de las resistencias a flexión de las probetas con diferentes porcentajes de cemento, comparando con probetas de referencia elaboradas con agua potable.

Tabla 23: Resistencias a flexión obtenidas para probetas elaboradas con agua potable y cemento CEM II/B-L 32.5N

CEM II FLEXIÓN AGUA POTABLE				
Tipo de Mortero	Promedio (Mpa)	Desviación Estándar	Mínimo (Mpa)	Máximo (Mpa)
CEM II AP 80/0	3,807	0,228	3,656	4,068
CEM II AP 90/0	4,527	0,171	4,330	4,638
CEM II AP 100/0	4,740	0,530	4,266	5,312

Tabla 24: Resistencias a flexión obtenidas para probetas elaboradas con agua residual y cemento CEM II/B-L 32.5N

CEM II FLEXIÓN AGUA RESIDUAL				
Tipo de Mortero	Promedio (Mpa)	Desviación Estándar	Mínimo (Mpa)	Máximo (Mpa)
CEM II AR 80/0	2,851	0,088	2,798	2,952
CEM II AR 90/0	3,570	0,129	3,429	3,681
CEM II AR 100/0	3,822	0,234	3,646	4,088

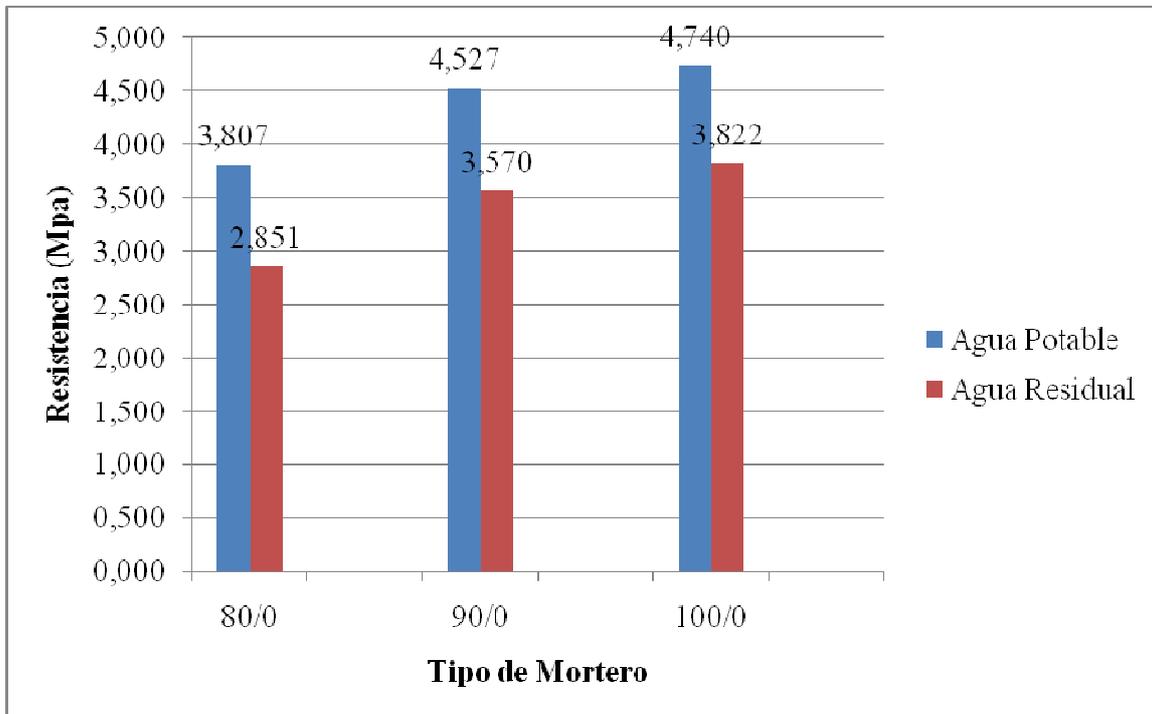


Figura 55: Comparación entre valores obtenidos con probetas de agua residual y agua potable, variando el porcentaje de cemento contenido.

El uso de cemento CEM II/B-L 32.5 N si influye en las resistencias obtenidas con las probetas realizadas con agua residual, en vista que se aprecia un decrecimiento notable en comparación con las muestras realizadas con CEM I. Además, los valores de resistencias

de las probetas elaboradas con agua potable son ligeramente inferiores a los de las probetas realizadas con agua potable y CEM I, pero esto se debe muy probablemente al hecho que el cemento tipo CEM II/B-L 32.5 N tiene una resistencia esperada más baja respecto al cemento CEM I 52.5 R. También se evidencia una mayor ganancia de resistencia en la medida en que el contenido de cemento aumenta, hecho que resultaba esperado.

5.5. Resistencia a Compresión del mortero endurecido

5.5.1. Efecto de las cenizas volantes de biomasa en la resistencia compresión del mortero endurecido

5.5.1.1. Probetas con arena natural

A continuación se presentan los resultados obtenidos de la resistencia a compresión en los morteros en los que se usó arena natural:

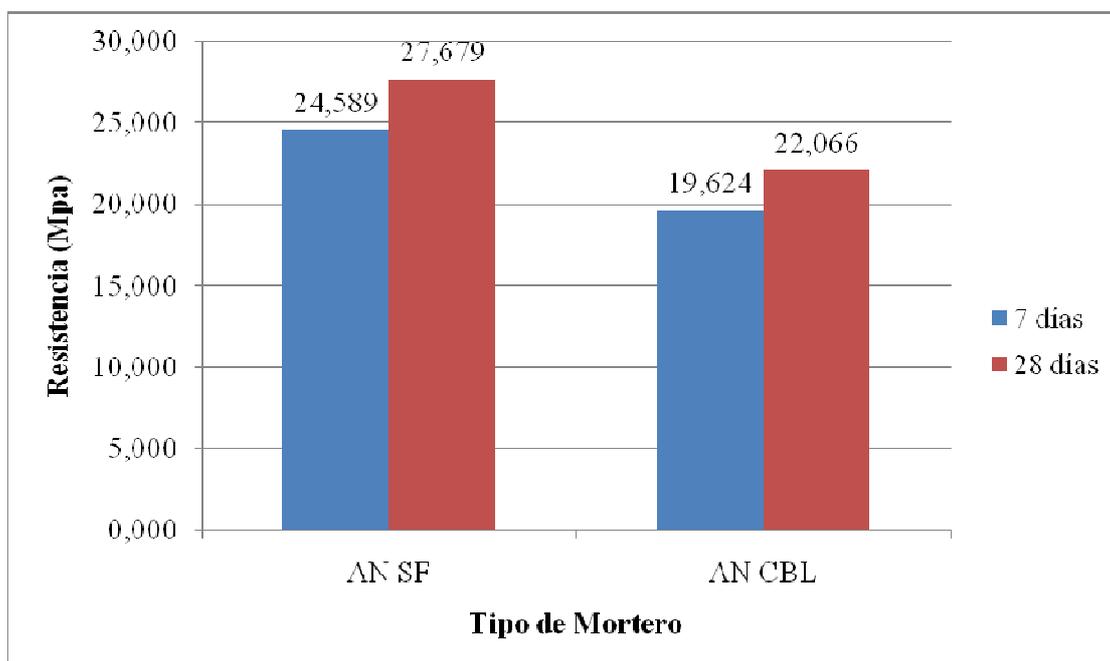


Figura 56: Resistencia a compresión de probetas elaboradas con arena natural, utilizando filler silíceo en el primer caso, y cenizas volantes de biomasa como sustituto en el segundo caso.

Tabla 25: Resumen estadístico de los datos presentados en la figura

Tipo de Mortero		Promedio (Mpa)	Desviación Estándar (Mpa)	Mínimo (Mpa)	Máximo (Mpa)
AN SF	7 días	24,589	2,006	21,454	26,196
	28 días	27,679	2,039	23,586	31,035
AN CBL	7 días	19,624	0,605	19,624	20,262
	28 días	22,066	1,117	19,671	22,999

Respecto a los resultados obtenidos, se puede apreciar que la sustitución del filler silíceo por las cenizas volantes de biomasa, ocasionan un descenso en las resistencias obtenidas,

obteniendo resultados por encima de los 27 Mpa a los 28 días en las que incorporan filler silíceo, mientras que las de cenizas volantes presentan valores cercanos a los 22 Mpa.

5.5.1.2. Probetas con R.C.D.

A continuación se presentan los resultados obtenidos de la resistencia a compresión en los morteros en los que se usó árido reciclado:

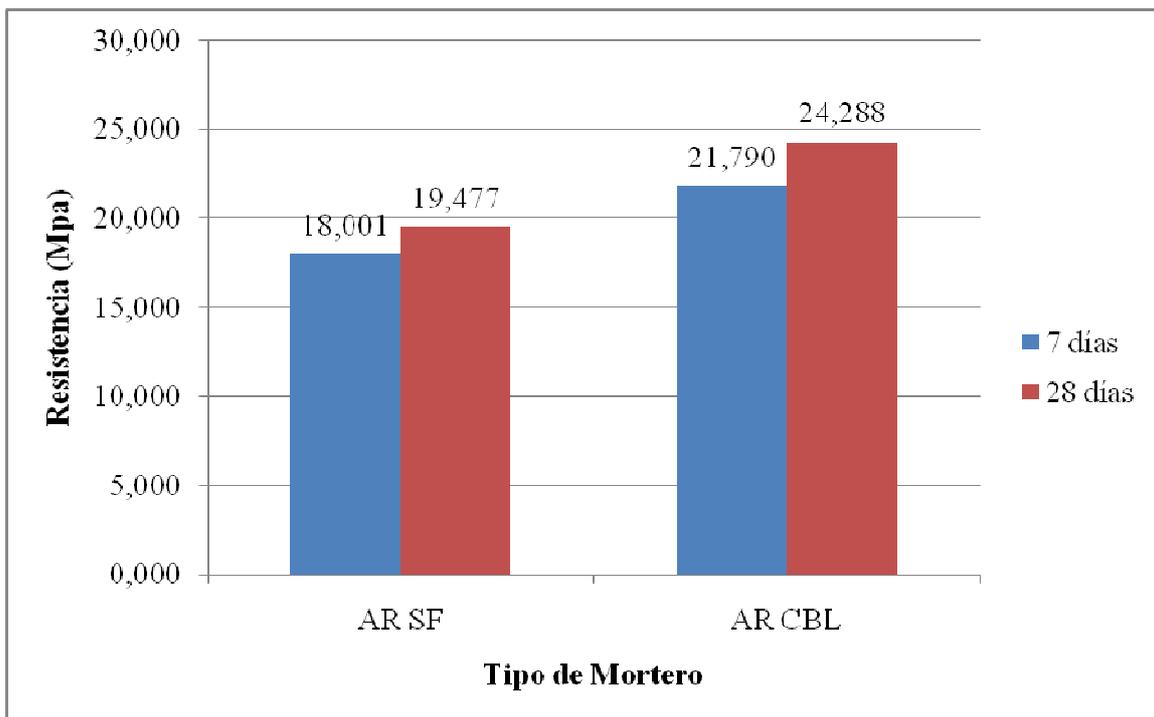


Figura 57: Resistencia a compresión de probetas elaboradas con árido reciclado, utilizando filler silíceo en el primer caso, y cenizas volantes de biomasa como sustituto en el segundo caso.

Tabla 26: Resumen estadístico de los datos presentados en la figura

Tipo de Mortero		Promedio (Mpa)	Desviación Estándar (Mpa)	Mínimo (Mpa)	Máximo (Mpa)
AR SF	7 días	18,001	1,106	16,797	19,541
	28 días	19,477	1,723	17,359	22,224
AR CBL	7 días	21,790	0,472	21,085	22,488
	28 días	24,288	0,726	23,296	26,156

En este caso, la incorporación de cenizas volantes como sustituto del filler silíceo permite una obtención de mayores resistencias a compresión tanto a 7 como a 28 días, hecho contrario al los resultados obtenidos en las muestras que incorporan arena natural como árido.

Es importante señalar que las probetas con cenizas volantes de biomasa en las mezclas que incorporan árido reciclado, presentan resistencias mayores a las de sus equivalentes que incorporan arena natural. Sin embargo, las probetas que se constituyen de filler silíceo y árido reciclado poseen resistencias más bajas que aquellas que se elaboraron con el árido reciclado, existiendo una mayor afinidad entre el filler y la arena natural.

5.5.2. Efecto de la incorporación del agua residual en las mezclas de amasado

5.5.2.1. Probetas elaboradas con Cemento CEM I 52.5 R

A continuación se presentan los resultados obtenidos de las resistencias a compresión de las probetas con diferentes porcentajes de cemento, comparando con probetas de referencia elaboradas con agua potable.

Tabla 27: Resistencias a compresión obtenidas para probetas elaboradas con agua potable y cemento CEM I 52.5 R

CEM I COMPRESIÓN AGUA POTABLE				
Tipo de Mortero	Promedio (Mpa)	Desviación Estándar (Mpa)	Mínimo (Mpa)	Máximo (Mpa)
CEM I AP 80/0	12,805	0,314	12,387	13,206
CEM I AP 90/0	16,207	0,734	14,902	16,890
CEM I AP 100/0	17,916	2,233	13,554	19,475

Tabla 28: Resistencias a compresión obtenidas para probetas elaboradas con agua residual y cemento CEM I 52.5 R

CEM I COMPRESIÓN AGUA RESIDUAL				
Tipo de Mortero	Promedio (Mpa)	Desviación Estándar (Mpa)	Mínimo (Mpa)	Máximo (Mpa)
CEM I AR 80/0	10,443	0,606	9,660	11,282
CEM I AR 90/0	14,974	0,976	14,111	16,549
CEM I AR 100/0	19,036	1,162	17,421	20,452

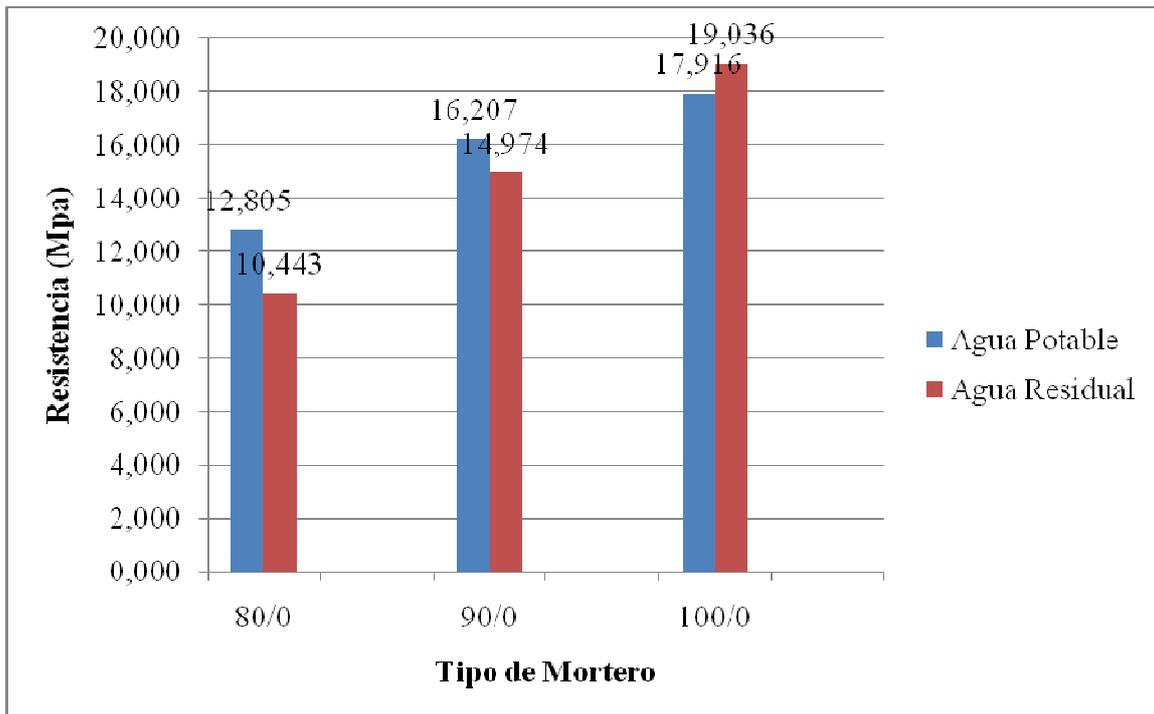


Figura 58: Comparación entre valores obtenidos con probetas de agua residual y agua potable, variando el porcentaje de cemento contenido.

Los resultados de resistencia a compresión a los 28 días evidencian una tendencia similar en ambos tipos de probetas, donde las constituidas con agua residual están por debajo de las realizadas con agua potable. Sin embargo, para un contenido de cemento del 100%, se aprecia que las muestras con agua residual tienen una resistencia de 19 Mpa, superior a las probetas elaboradas con agua potable.

5.5.2.2. Probetas elaboradas con Cemento CEM II/B-L 32.5N

Tabla 29: Resistencias a compresión obtenidas para probetas elaboradas con agua potable y cemento CEM II/B-L 32.5 N

CEM II COMPRESIÓN AGUA POTABLE				
Tipo de Mortero	Promedio (Mpa)	Desviación Estándar	Mínimo (Mpa)	Máximo (Mpa)
CEM II AP 80/0	9,590	0,343	9,300	10,211
CEM II AP 90/0	12,560	0,405	12,122	13,051
CEM II AP 100/0	13,466	0,867	12,463	14,923

Tabla 30: Resistencias a compresión obtenidas para probetas elaboradas con agua residual y cemento CEM II/B-L 32.5 N

CEM II COMPRESIÓN AGUA RESIDUAL				
Tipo de Mortero	Promedio (Mpa)	Desviación Estándar (Mpa)	Mínimo (Mpa)	Máximo (Mpa)
CEM II AR 80/0	7,587	0,657	6,539	8,407
CEM II AR 90/0	9,891	0,483	9,029	10,249
CEM II AR 100/0	12,035	0,427	11,471	12,570

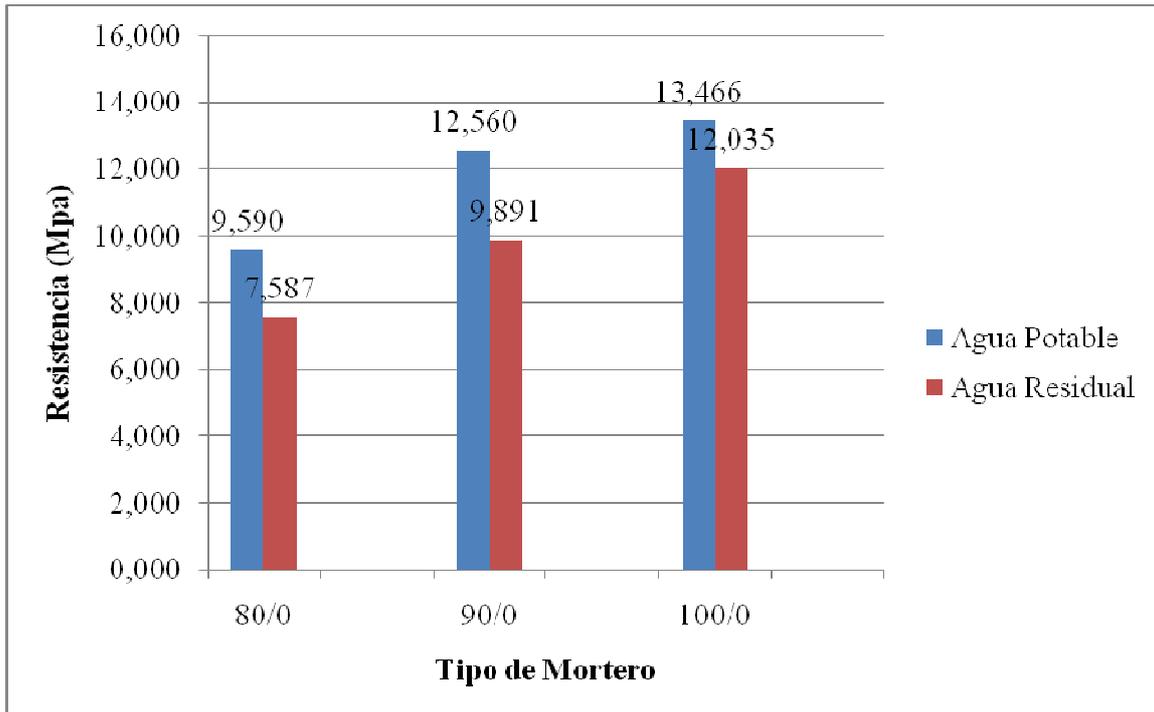


Figura 59: Comparación entre valores obtenidos con probetas de agua residual y agua potable, variando el porcentaje de cemento contenido.

En este caso se evidencian resistencias más bajas a compresión que las obtenidas usando el cemento CEM I 52.5 R, debido a que este último tiene una resistencia esperada mayor. Además, en este caso todas las probetas con agua residual presentaron resistencias a compresión más bajas respecto a aquellas elaboradas con agua residual, añadiendo que en la medida en que el contenido de cemento aumenta, lo hace también la resistencia.

5.6. Retracción del Mortero Endurecido

5.6.1. Efecto de la sustitución de cenizas volantes de biomasa en la retracción del mortero endurecido

5.6.1.1. Probetas elaboradas con arena natural como árido de la amasada

La medición de la retracción de las probetas se realizó a lo largo de 28 días, con tres repeticiones de cada amasada X, Y y Z. A continuación se presentan los resultados obtenidos:

Tabla 31: Medición de longitud de las probetas de los morteros AN SF

MUESTRA: AN SF							
FECHA	EDAD (días)	PESO (g)			LECTURA (mm)		
		X	Y	Z	X	Y	Z
13/05/2014	2	571,32	575,22	577,53	-1,766	-1,773	-1,740
19/05/2014	7	547,03	550,05	552,58	-1,809	-1,833	-1,782
26/05/2014	14	545,09	547,72	550,19	-1,837	-1,864	-1,813
09/06/2014	28	545,22	547,79	550,28	-1,853	-1,888	-1,826

Tabla 32: Retracción media y desviación estándar de las probetas de los morteros AN SF

MUESTRA: AN SF					
EDAD (días)	Rx (mm/m)	Ry (mm/m)	Rz (mm/m)	Desviación Estándar (mm/m)	R media (mm/m)
7,00	-0,269	-0,375	-0,263	0,063	-0,302
14,00	-0,444	-0,569	-0,456	0,069	-0,490
28,00	-0,544	-0,719	-0,538	0,103	-0,600

Tabla 33: Medición de longitud de las probetas de los morteros AN CBL

MUESTRA: AN CBL							
FECHA	EDAD (días)	PESO (g)			LECTURA		
		X	Y	Z	X	Y	Z
13/05/2014	2	583,50	587,43	589,49	-2,006	-2,194	-1,976
19/05/2014	7	571,79	576,00	578,77	-2,072	-2,245	-2,019
26/05/2014	14	566,86	573,90	571,15	-2,136	-2,306	-2,074
09/06/2014	28	566,04	570,25	572,96	-2,161	-2,332	-2,102

Tabla 34: Retracción media y desviación estándar de las probetas de los morteros AN CBL

MUESTRA: AN CBL					
EDAD (días)	Rx (mm/m)	Ry (mm/m)	Rz (mm/m)	Desviación Estándar (mm/m)	R media (mm/m)
7	-0,413	-0,319	-0,269	0,073	-0,333
14	-0,813	-0,700	-0,612	0,100	-0,708
28	-0,969	-0,862	-0,787	0,091	-0,873

El gráfico que se muestra a continuación representa la retracción media de las probetas, mostrando la diferencia ante una sustitución del filler silíceo por las cenizas de biomasa, considerando el uso de arena natural como árido

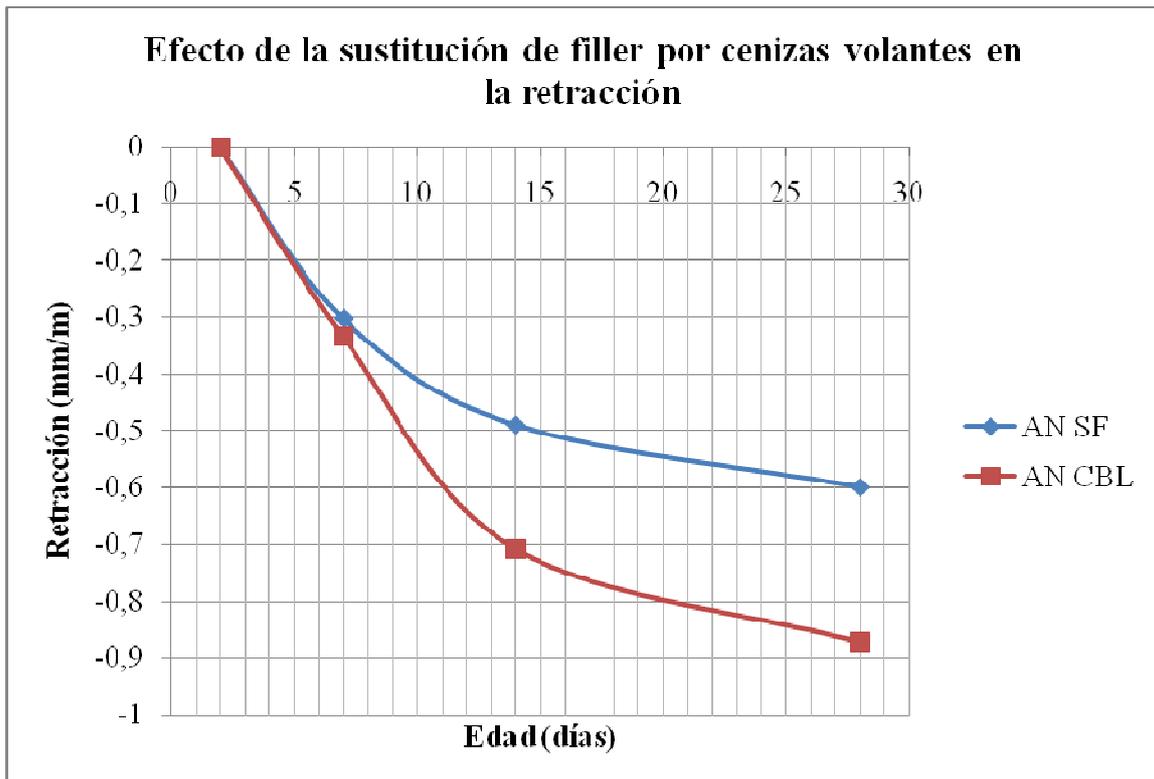


Figura 60: Efecto de la sustitución de filler silíceo por cenizas volantes en la retracción de probetas con árido constituido por arena natural.

A partir del comportamiento de los datos presentes en el gráfico, se puede evidenciar que la retracción es mayor en las probetas que incorporan a las cenizas volantes como sustituto del filler silíceo. Sin embargo a edades tempranas la retracción es muy similar, del orden de 0,3 mm/m aproximadamente, mientras que a los 28 días, las probetas con cenizas volantes se retraen un 50% más que aquellas que incorporan filler silíceo.

Tabla 35: Variación de la masa de las probetas tipo AN SF a diferentes edades de ensayo

MUESTRA: AN SF						
EDAD (días)	ΔM_x (g)	ΔM_y (g)	ΔM_z (g)	Masa Media (g)	ΔM Medio (g)	% ΔM
7,00	-24,29	-25,17	-24,95	549,89	-24,80	-4,32
14,00	-26,23	-27,50	-27,34	547,67	-27,02	-4,70
28,00	-26,10	-27,43	-27,25	547,76	-26,93	-4,69

Tabla 36: Variación de la masa de las probetas tipo AN CBL a diferentes edades de ensayo

MUESTRA: AN CBL						
EDAD (días)	ΔM_x (g)	ΔM_y (g)	ΔM_z (g)	Masa Media (g)	ΔM Medio (g)	% ΔM
7,00	-11,71	-11,43	-10,72	575,52	-11,29	-1,92
14,00	-16,64	-13,53	-18,34	570,64	-16,17	-2,76
28,00	-17,46	-17,18	-16,53	569,75	-17,06	-2,91

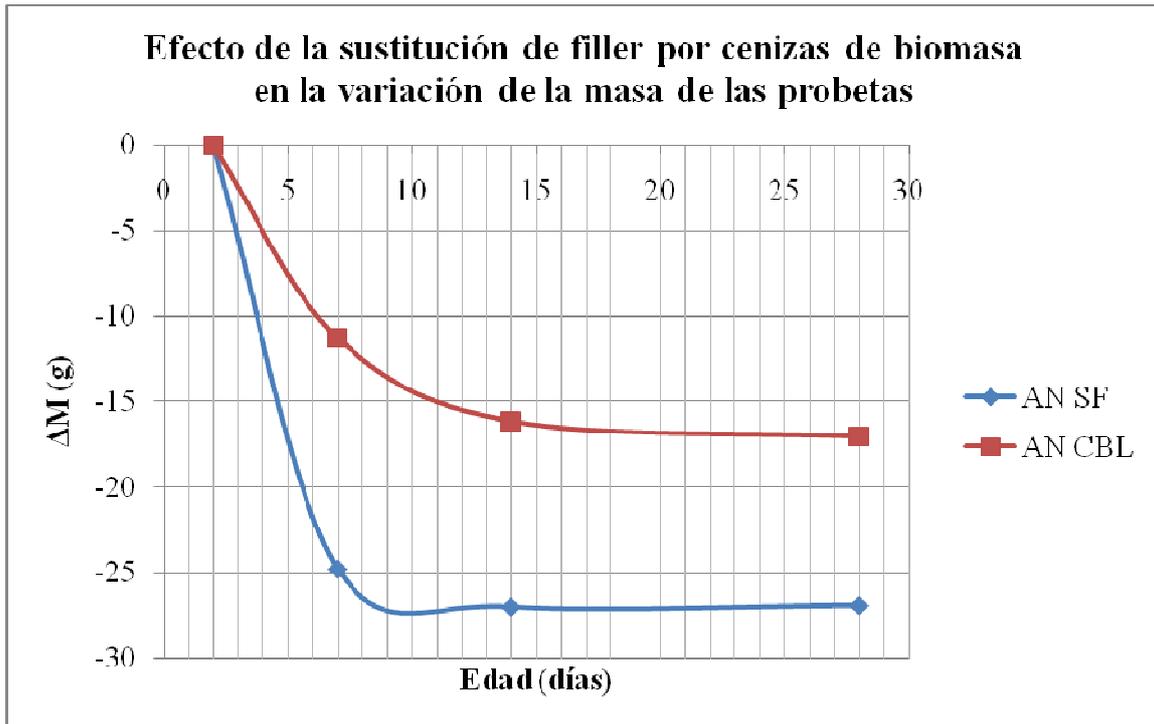


Figura 61: Efecto de la sustitución del filler por cenizas de biomasa en la variación de la masa de las probetas elaboradas con arena natural como árido constituyente del mortero.

Se puede apreciar en esta gráfica que cuando las cenizas volantes sustituyen al filler silíceo, ocasionan una pérdida de masa mayor, hecho que puede ser debido a una mayor evaporación de agua en el interior, que ocasiona una mayor pérdida de peso, y probablemente sea un hecho relacionado con la presencia de una matriz más porosa, capaz de generar más huecos en el interior del mortero respecto a las probetas que incorporan el filler silíceo.

5.6.1.2. Probetas elaboradas con R.C.D. como árido de la amasada

La medición de la retracción de las probetas se realizó a lo largo de 28 días, con tres repeticiones de cada amasada X, Y y Z. A continuación se presentan los resultados obtenidos:

Tabla 37: Medición de longitud de las probetas de los morteros AN SF

MUESTRA: AR SF							
FECHA	EDAD (días)	PESO (g)			LECTURA		
		X	Y	Z	X	Y	Z
13/05/2014	2	513,25	510,64	512,21	-1,637	-1,910	-1,771
19/05/2014	7	477,07	475,96	476,42	-1,695	-1,967	-1,830
26/05/2014	14	470,80	468,78	470,06	-1,773	-2,051	-1,913
09/06/2014	28	470,42	468,34	469,60	-1,797	-2,076	-1,935

Tabla 38: Retracción media y desviación estándar de las probetas de los morteros AR SF

MUESTRA: AR SF					
EDAD (días)	Rx (mm/m)	Ry (mm/m)	Rz (mm/m)	Desviación Estándar (mm/m)	R media (mm/m)
7,00	-0,363	-0,356	-0,369	0,006	-0,363
14,00	-0,850	-0,881	-0,888	0,020	-0,873
28,00	-1,000	-1,038	-1,025	0,019	-1,021

Tabla 39: Medición de longitud de las probetas de los morteros AR CBL

MUESTRA: AR CBL							
FECHA	EDAD (días)	PESO (g)			LECTURA		
		X	Y	Z	X	Y	Z
13/05/2014	2	529,48	533,30	530,26	-1,684	-1,651	-1,792
19/05/2014	7	512,53	516,21	513,29	-1,755	-1,723	-1,871
26/05/2014	14	502,23	506,54	503,59	-1,896	-1,864	-2,003
09/06/2014	28	500,17	504,44	501,44	-1,949	-1,911	-2,053

Tabla 40: Retracción media y desviación estándar de las probetas de los morteros AR CBL

MUESTRA: AR CBL					
EDAD (días)	Rx (mm/m)	Ry (mm/m)	Rz (mm/m)	Desviación Estándar (mm/m)	R media (mm/m)
7	-0,444	-0,450	-0,494	0,027	-0,463
14	-1,325	-1,331	-1,319	0,006	-1,325
28	-1,656	-1,625	-1,631	0,017	-1,638

El gráfico que se muestra a continuación representa la retracción media de las probetas, mostrando la diferencia ante una sustitución del filler silíceo por las cenizas de biomasa, considerando el uso de R.C.D. como árido.

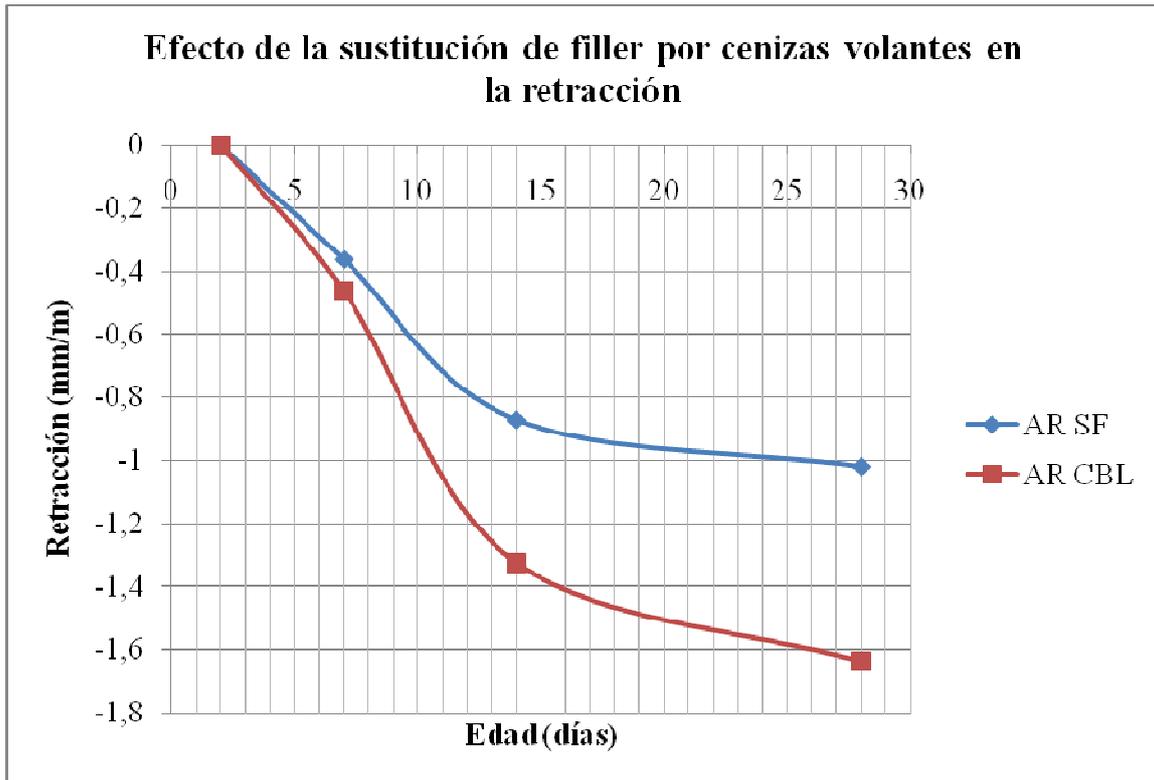


Figura 62: Efecto de la sustitución de filler silíceo por cenizas volantes en la retracción de probetas con árido constituido por R.C.D.

En este caso, a edades tempranas la retracción es muy similar entre ambos tipos de probetas (AR SF y AR CBL). Sin embargo, a los 28 días se evidencia que las probetas con cenizas volantes se retraen aproximadamente un 60% más que aquellas que incorporan filler silíceo, estas últimas con valores de 1 mm/m aproximadamente, e igualmente superiores a las probetas elaboradas con arena natural.

A partir de estos valores se podría inferir acerca de una estructura más porosa en las probetas con R.C.D., puesto que al evaporarse una mayor cantidad de agua en su interior, ocasionan una mayor retracción.

Tabla 41: Variación de la masa de las probetas tipo AR SF a diferentes edades de ensayo

MUESTRA: AR SF						
EDAD (días)	ΔM_x (g)	ΔM_y (g)	ΔM_z (g)	Masa Media (g)	ΔM Medio (g)	% ΔM
7,00	-36,18	-34,68	-35,79	476,48	-35,55	-6,94
14,00	-42,45	-41,86	-42,15	469,88	-42,15	-8,23
28,00	-42,83	-42,30	-42,61	469,45	-42,58	-8,32

Tabla 42: Variación de la masa de las probetas tipo AR CBL a diferentes edades de ensayo

MUESTRA: AR CBL						
EDAD (días)	ΔM_x (g)	ΔM_y (g)	ΔM_z (g)	Masa Media (g)	ΔM Medio (g)	% ΔM
7,00	-16,95	-17,09	-16,97	514,01	-17,00	-3,20
14,00	-27,25	-26,76	-26,67	504,12	-26,89	-5,06
28,00	-29,31	-28,86	-28,82	502,02	-29,00	-5,46

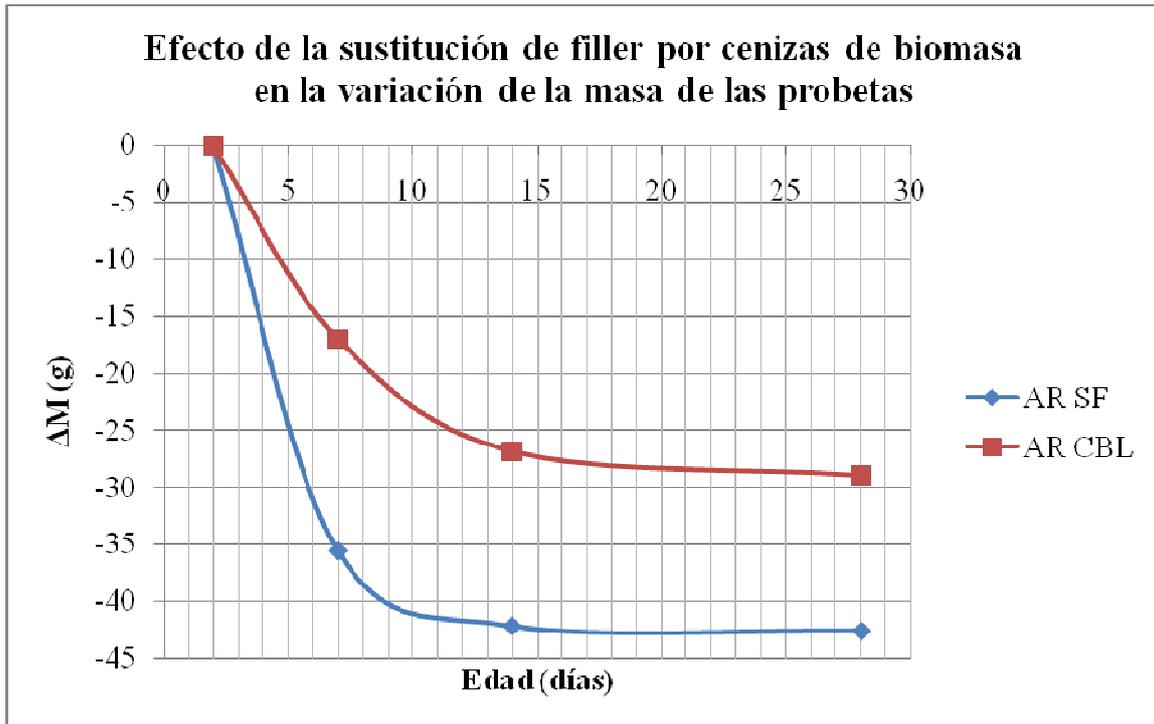


Figura 63: Efecto de la sustitución del filler por cenizas de biomasa en la variación de la masa de las probetas elaboradas con R.C.D. como árido constituyente del mortero.

En este caso, la pérdida de masa es mayor respecto a las probetas elaboradas con arena natural, confirmando la hipótesis sujeta en párrafos anteriores, donde se obtuvo una mayor retracción en las probetas con R.C.D., por cuanto se podría inferir sobre una estructura más porosa en estas probetas. Además, la utilización de cenizas volantes se traduce en una pérdida de peso mayor que en las que se constituyeron con filler silíceo.

5.7. Permeabilidad del Mortero endurecido

5.7.1. Efecto de las cenizas volantes de biomasa en la permeabilidad del mortero endurecido

5.7.1.1. Probetas elaboradas con arena natural

A continuación se presentan los resultados de permeabilidad de las probetas elaboradas con arena natural. Se realizaron tres (3) repeticiones del ensayo por cada amasada:

Tabla 43: Permeabilidad de la probeta AN SF 1-1

ÁREA (m ²)	0,02
Δp (Pa) Nitrato potásico	974
R _A (Pa m ² s/Kg)	48000000
$\Delta G/\Delta t$ (g/h)	0,014
λ (Kg/m ² s Pa)	2,0157E-10
Permeabilidad (Kg m/m ² s Pa)	3,6806E-12
μ (Coeficiente de permeabilidad)	52,71

Tabla 44: Permeabilidad de la probeta AN SF 1-2

ÁREA (m ²)	0,02
Δp (Pa) Nitrato potásico	974
R _A (Pa m ² s/Kg)	48000000
$\Delta G/\Delta t$ (g/h)	0,0155
λ (Kg/m ² s Pa)	2,2339E-10
Permeabilidad (Kg m/m ² s Pa)	4,0831E-12
μ (Coeficiente de permeabilidad)	47,51

Tabla 45: Permeabilidad de la probeta AN SF 1-3

ÁREA (m ²)	0,02
Δp (Pa) Nitrato potásico	974
R _A (Pa m ² s/Kg)	48000000
$\Delta G/\Delta t$ (g/h)	0,0134
λ (Kg/m ² s Pa)	1,9285E-10
Permeabilidad (Kg m/m ² s Pa)	3,6038E-12
μ (Coeficiente de permeabilidad)	53,83

Tabla 46: Valor medio de permeabilidad de las probetas AN SF

λ media (Kg/m ² s Pa)	Espesor medio (m)	Permeabilidad media (Kg m/m ² s Pa)
2,06E-10	0,0184	3,79E-12

Tabla 47: Permeabilidad de la probeta AN CBL 1-1

ÁREA (m ²)	0,02
Δp (Pa) Nitrato potásico	974
R _A (Pa m ² s/Kg)	48000000
$\Delta G/\Delta t$ (g/h)	0,012
λ (Kg/m ² s Pa)	1,7253E-10
Permeabilidad (Kg m/m ² s Pa)	3,1168E-12
μ (Coeficiente de permeabilidad)	62,24

Tabla 48: Permeabilidad de la probeta AN CBL 1-2

ÁREA (m ²)	0,02
Δp (Pa) Nitrato potásico	974
R_A (Pa m ² s/Kg)	48000000
$\Delta G/\Delta t$ (g/h)	0,0129
λ (Kg/m ² s Pa)	1,8559E-10
Permeabilidad (Kg m/m ² s Pa)	3,4348E-12
μ (Coeficiente de permeabilidad)	56,48

Tabla 49: Permeabilidad de la probeta AN CBL 1-3

ÁREA (m ²)	0,02
Δp (Pa) Nitrato potásico	974
R_A (Pa m ² s/Kg)	48000000
$\Delta G/\Delta t$ (g/h)	0,0175
λ (Kg/m ² s Pa)	2,5257E-10
Permeabilidad (Kg m/m ² s Pa)	4,7199E-12
μ (Coeficiente de permeabilidad)	41,10

Tabla 50: Permeabilidad media de las probetas AN CBL

λ media (Kg/m ² s Pa)	Espesor medio (m)	Permeabilidad media (Kg m/m ² s Pa)
2,04E-10	0,0184	3,76E-12

Estos resultados demuestran mucha similitud entre los valores de permeabilidad de las probetas que incorporan arena natural como árido, tanto de aquellas que se constituyen de filler silíceo, como de las que tienen cenizas volantes de biomasa.

5.7.1.2. Probetas elaboradas con R.C.D.

Tabla 51: Permeabilidad de la probeta AR SF 1-1

ÁREA (m ²)	0,02
Δp (Pa) Nitrato potásico	974
R_A (Pa m ² s/Kg)	48000000
$\Delta G/\Delta t$ (g/h)	0,0233
λ (Kg/m ² s Pa)	3,3763E-10
Permeabilidad (Kg m/m ² s Pa)	6,3171E-12
μ (Coeficiente de permeabilidad)	30,71

Tabla 52: Permeabilidad de la probeta AR SF 1-2

ÁREA (m ²)	0,02
Δp (Pa) Nitrato potásico	974
R_A (Pa m ² s/Kg)	48000000
$\Delta G/\Delta t$ (g/h)	0,0229
λ (Kg/m ² s Pa)	3,3175E-10
Permeabilidad (Kg m/m ² s Pa)	6,4085E-12
μ (Coeficiente de permeabilidad)	30,27

Tabla 53: Permeabilidad de la probeta AR SF 1-3

ÁREA (m ²)	0,02
Δp (Pa) Nitrato potásico	974
R _A (Pa m ² s/Kg)	48000000
ΔG/Δt (g/h)	0,0205
λ (Kg/m ² s Pa)	2,9648E-10
Permeabilidad (Kg m/m ² s Pa)	5,3115E-12
μ (Coeficiente de permeabilidad)	36,52

Tabla 54: Valor medio de permeabilidad de las probetas AR SF

λ media (Kg/m ² s Pa)	Espesor medio (m)	Permeabilidad media (Kg m/m ² s Pa)
3,22E-10	0,0186	6,01E-12

Tabla 55: Permeabilidad de la probeta AR CBL 1-1

ÁREA (m ²)	0,02
Δp (Pa) Nitrato potásico	974
R _A (Pa m ² s/Kg)	48000000
ΔG/Δt (g/h)	0,0216
λ (Kg/m ² s Pa)	3,1263E-10
Permeabilidad (Kg m/m ² s Pa)	5,9572E-12
μ (Coeficiente de permeabilidad)	32,57

Tabla 56: Permeabilidad de la probeta AR CBL 1-2

ÁREA (m ²)	0,02
Δp (Pa) Nitrato potásico	974
R _A (Pa m ² s/Kg)	48000000
ΔG/Δt (g/h)	0,0244
λ (Kg/m ² s Pa)	3,5384E-10
Permeabilidad (Kg m/m ² s Pa)	6,7549E-12
μ (Coeficiente de permeabilidad)	28,72

Tabla 57: Permeabilidad de la probeta AR CBL 1-3

ÁREA (m ²)	0,02
Δp (Pa) Nitrato potásico	974
R _A (Pa m ² s/Kg)	48000000
ΔG/Δt (g/h)	0,0224
λ (Kg/m ² s Pa)	3,2439E-10
Permeabilidad (Kg m/m ² s Pa)	6,1812E-12
μ (Coeficiente de permeabilidad)	31,39

Tabla 58: Valor medio de la permeabilidad AR CBL

λ media (Kg/m ² s Pa)	Espesor medio (m)	Permeabilidad media (Kg m/m ² s Pa)
3,30E-10	0,0191	6,30E-12

A partir de estos resultados se puede decir que las muestras que incorporan cenizas volantes, tienen una mayor permeabilidad que aquellas que contienen filler silíceo, hecho relacionado con la retracción y la pérdida de peso que se da en mayor medida en estas probetas.

Además, las probetas con árido reciclado presentan una mayor permeabilidad que aquellas elaboradas con árido natural, lo cual puede ser indicativo de una matriz más porosa en este tipo de mezclas.

5.8. Adherencia del mortero endurecido

Tabla 59: Adherencia de las probetas AN-SF

PROBETA: AN SF			
Repeticiones	Fu (Kgf)	Fu (N)	fu (N/mm ²)
1	14,00	137,34	0,07
2	12,00	117,72	0,06
3	18,00	176,58	0,09
4	12,00	117,72	0,06
5	15,00	147,15	0,07
Promedio (N/mm ²)			0,07
D. Estándar (N/mm ²)			0,01

Tabla 60: Adherencia de las probetas AN-CBL

PROBETA: AN CBL			
Repeticiones	Fu (Kgf)	Fu (N)	fu (N/mm ²)
1	16,00	156,96	0,08
2	15,00	147,15	0,07
3	15,00	147,15	0,07
4	14,00	137,34	0,07
5	20,00	196,20	0,10
Promedio (N/mm ²)			0,08
D. Estándar (N/mm ²)			0,01

Tabla 61: Adherencia de las probetas AR-SF

PROBETA: AR SF			
Repeticiones	Fu (Kgf)	Fu (N)	fu (N/mm ²)
1	14,00	137,34	0,07
2	10,00	98,10	0,05
3	10,00	98,10	0,05
4	10,00	98,10	0,05
5	12,00	117,72	0,06
Promedio (N/mm ²)			0,06
D. Estándar (N/mm ²)			0,01

Tabla 62: Adherencia de las probetas AR-CBL

PROBETA: AR CBL			
Repeticiones	Fu (Kgf)	Fu (N)	fu (N/mm ²)
1	14,00	137,34	0,07
2	14,00	137,34	0,07
3	20,00	196,20	0,10
4	12,00	117,72	0,06
5	14,00	137,34	0,07
Promedio (N/mm ²)			0,07
D. Estándar (N/mm ²)			0,02

La adherencia de las probetas resulta muy similar en todas las probetas, pero con un valor considerablemente bajo.

6. CONCLUSIONES

Luego de la realización de la presente investigación se pueden realizar una serie de conclusiones importantes sobre las diferentes propiedades del mortero endurecido con el cumplimiento de los objetivos planteados.

Respecto a los parámetros químicos del agua residual utilizada en el amasado, se puede concluir que cumple con los valores admisibles establecidos en el artículo 27 de la instrucción de hormigón estructural EHE-08, a pesar que pueda tener cierta influencia sobre las propiedades mecánicas del mortero endurecido, hecho que será comentado más adelante.

Desde el punto de vista mecánico, se puede concluir que la adición de cenizas volantes de biomasa resulta más favorable al utilizar R.C.D. como árido, debido que se obtuvieron resistencias más elevadas a los 28 días respecto a las probetas que incorporaron arena natural. Sin embargo hay que señalar el hecho que para las muestras elaboradas con filler silíceo, hubo un mejor comportamiento en las probetas elaboradas con arena natural, puesto que estas presentaron mayores resistencias.

En el caso de las probetas realizadas con agua residual, se apreció una ganancia de resistencias en la medida en que el contenido de cemento aumenta, pero los valores obtenidos resultan más bajos que con agua potable, hecho más notorio con el uso del cemento CEM II/B-L 32.5N. Sin embargo, las probetas realizadas con CEM I 52.5 R mostraron valores similares para ambos tipos de agua, por cuanto probablemente no exista influencia en esta propiedad con el uso de este cemento. El cemento tipo CEM II/B-L 32.5 N tiene una resistencia esperada más baja, por cuanto podría ser un poco más sensible frente a ciertos constituyentes presentes en el agua residual tratada. Por otra parte, a pesar que un mayor contenido de cemento se traduce en mayores resistencias, estas resultan más bajas que en las probetas dosificadas para evaluar la influencia de las cenizas volantes, hecho que puede ser atribuido a la inexistencia de filler, capaz de mejorar la compacidad de la mezcla, y permitir lograr resistencias más elevadas.

Con la resistencia a compresión el comportamiento es prácticamente el mismo; las probetas realizadas con arena natural tuvieron un decrecimiento de resistencias al incluir las cenizas volantes como sustituto del filler silíceo; mientras que en las probetas realizadas con R.C.D. la resistencia aumento con la presencia de las cenizas volantes. Sin embargo, el filler tiene más afinidad con el uso de arena natural antes que con el R.C.D., ya que en este último caso las resistencias fueron más bajas.

La incorporación de agua residual se tradujo en un decrecimiento de resistencias a compresión respecto a los morteros de referencia, respecto a un mismo contenido de cemento. El hecho de utilizar CEM II/B-L 32.5 N ocasiona resistencias más bajas en todos los casos, hecho no atribuible al agua residual sino a características propias de la resistencia del cemento.

Partiendo de los resultados de permeabilidad y retracción, se podría concluir que las probetas de mortero elaboradas con R.C.D. presentan una estructura más porosa, dado que la retracción experimentada fue mayor, así como la pérdida de peso, indicativo de un mayor número de huecos ocupados inicialmente por agua. Además, la incorporación de cenizas se traduce en valores más altos de estas propiedades respecto al filler silíceo, por cuanto resulta indicativo que la adición de cenizas confiere al mortero una matriz más porosa y susceptible de sufrir una agresión del entorno con mayor severidad que en las probetas elaboradas con filler silíceo y arena natural.

Un aspecto que puede resultar comprometedor es el referente a la adherencia, que resultó considerablemente baja, lo cual puede incidir en la aplicabilidad o permanencia en el tiempo de este tipo de morteros. De los resultados obtenidos se concluye además que el efecto de las cenizas sobre esta propiedad no es tan notorio, debido a la gran similitud entre los valores obtenidos.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Chindaprasirt, P., Buapa N. y Cao, H.T. (2005). Mixed cement containing fly ash for masonry and plastering work. *Construction and Building Materials* (19):612-618.
- (2) Cruz-Yusta, M. y otros. (2011). Use of Olive Biomass Fly Ash in the Preparation of Environmentally Friendly Mortars. *Environmental Science & Technology* (45):6991-6996.
- (3) Maschio, S. y otros (2011). Fly and bottom ashes from biomass combustion as cement replacing components in mortars production: Rheological behaviour of the pastes and materials compression strength. *Chemosphere* (85):666-671.
- (4) Tkaczewska, E., Mróz, R. y Łój, G. (2012). Coal–biomass fly ashes for cement production of CEM II/A-V 42.5R. *Construction and Building Materials* (28):633-639.
- (5) Sata, V. y otros. (2012). Effect of W/B ratios on pozzolanic reaction of biomass ashes in Portland cement matrix. *Cement and concrete composites* (34):94-100.
- (6) Wang, S. y Baxter, L. (2007). Comprehensive study of biomass fly ash in concrete: Strength, microscopy, kinetics and durability. *Fuel Processing Technology* (88):1165-1170.
- (7) Jiménez, J.R. y otros. (2013). Use of fine recycled aggregates from ceramic waste in masonry mortar manufacturing. *Construction and Building Materials* (40):679-690.
- (8) Corinaldesi, V. y Moriconi, G. (2009). Behaviour of cementitious mortars containing different kinds of recycled aggregate. *Construction and Building Materials* (23):289-294.
- (9) Martínez, I. y otros. (2013). A comparative analysis of the properties of recycled and natural aggregate in masonry mortars. *Construction and Building Materials* (49):384-392.

- (10) Sales, A. y Rodrigues, F. (2009). Concretes and mortars recycled with water treatment sludge and construction and demolition rubble. *Construction and Building Materials* (23):2362-2370.
- (11) Diéguez, V. (2011). Propiedades físicas del concreto elaborado con agua residual tratada. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas. [Consulta: 2014, Abril 21].
- (12) Yepes, H. (2013). Comportamiento de mezclas de concreto elaboradas con agua residual tratada. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas. [Consulta: 2014, Abril 22].

10. ANEXOS

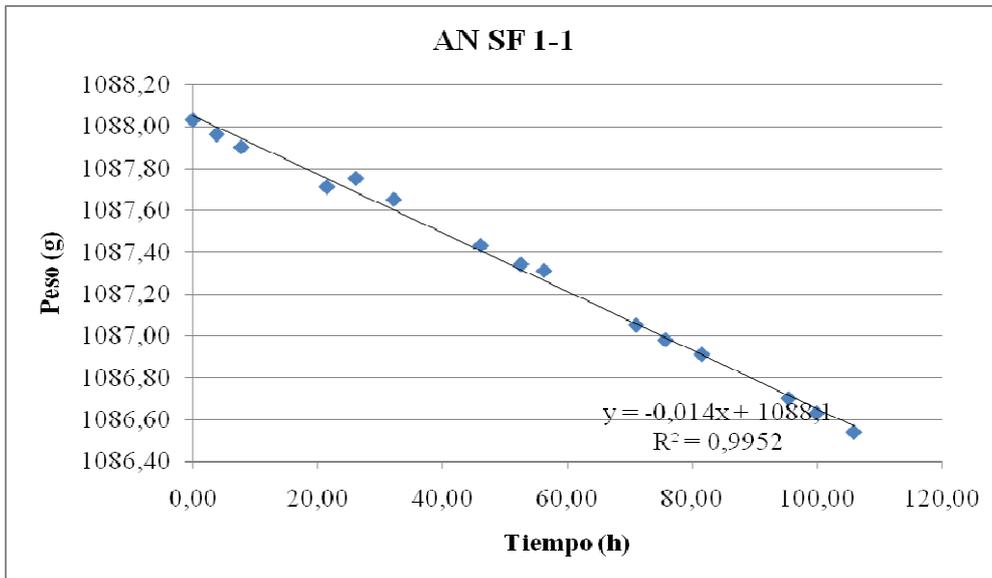


Figura 64: Variación del peso en ensayo de permeabilidad AN SF 1-1

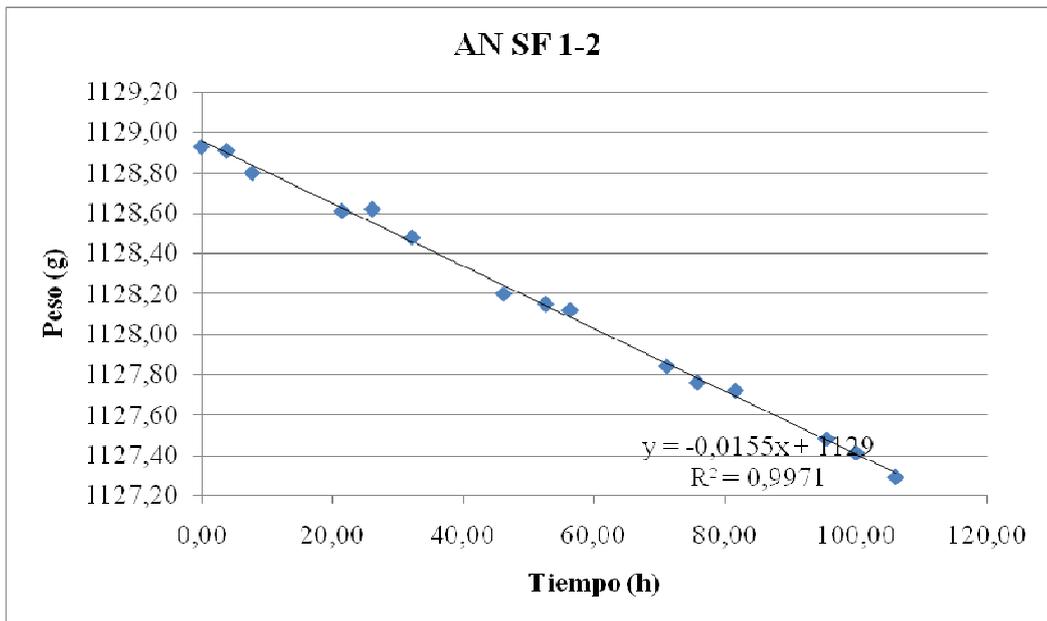


Figura 65: Variación del peso en ensayo de permeabilidad AN SF 1-2

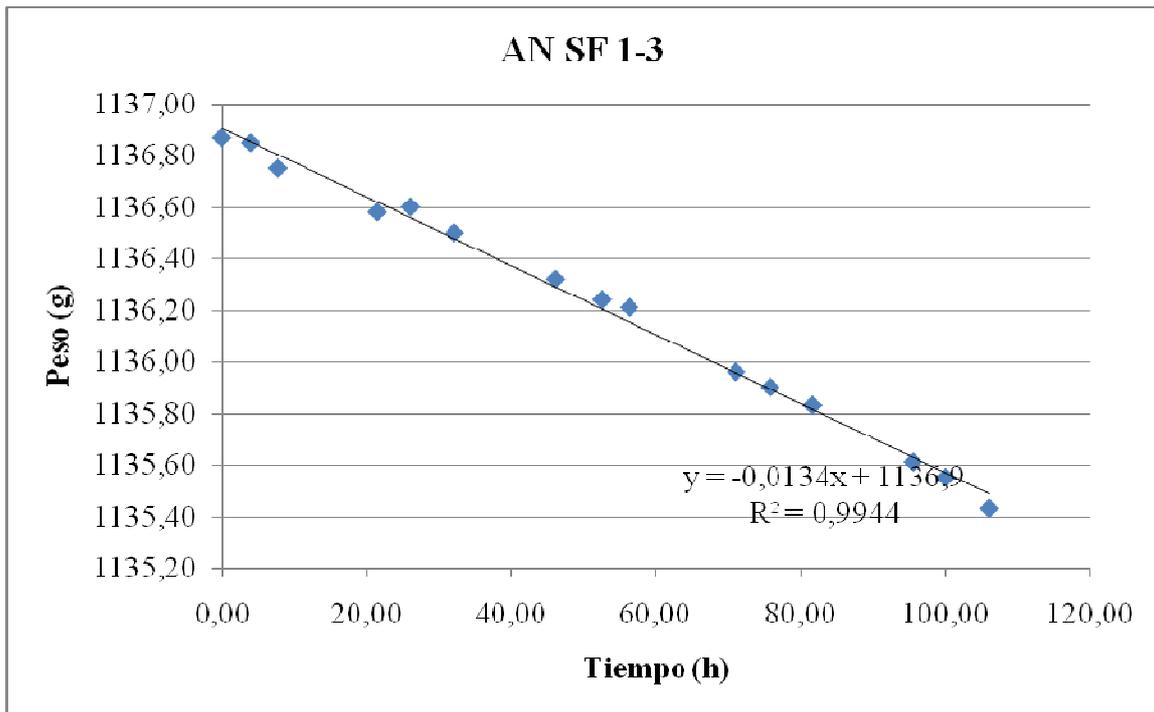


Figura 66: Variación del peso en ensayo de permeabilidad AN SF 1-3

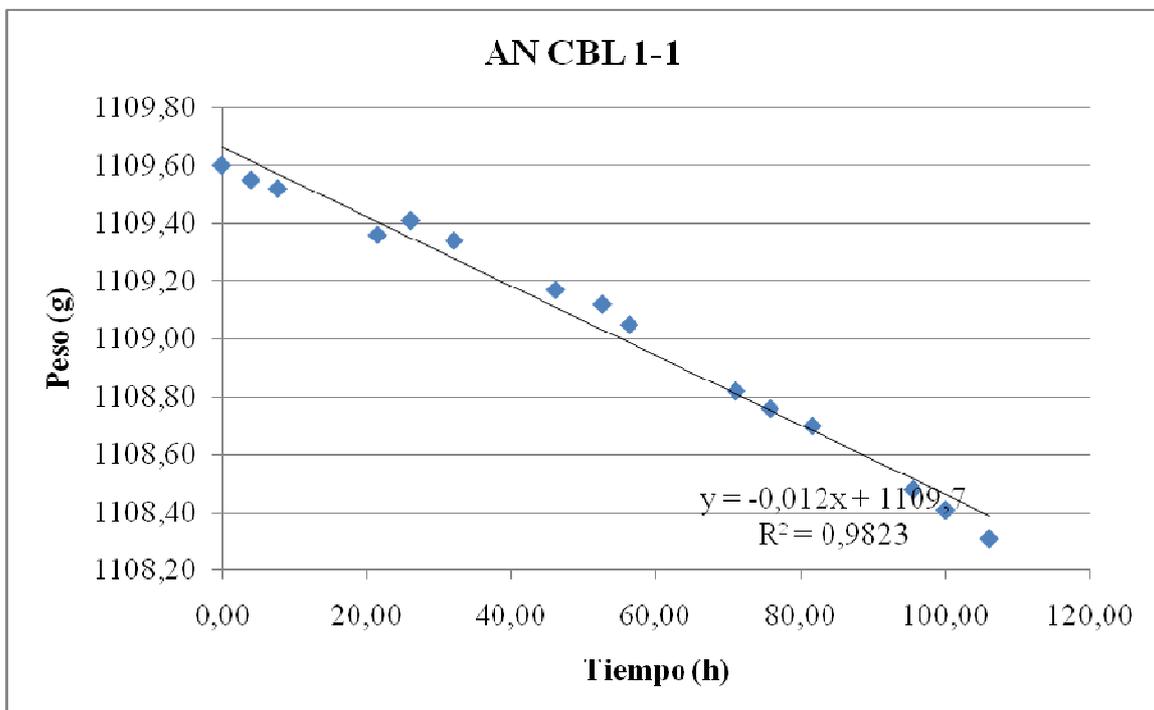


Figura 67: Variación del peso en ensayo de permeabilidad AN CBL 1-1

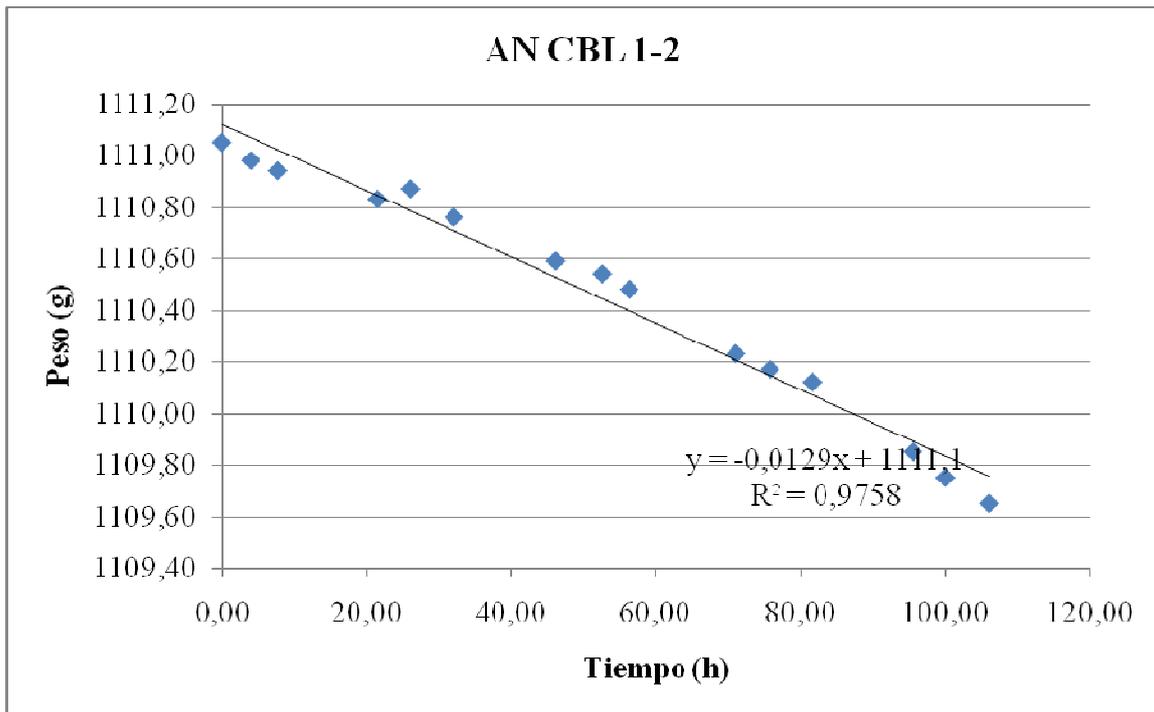


Figura 68: Variación del peso en ensayo de permeabilidad AN CBL 1-2

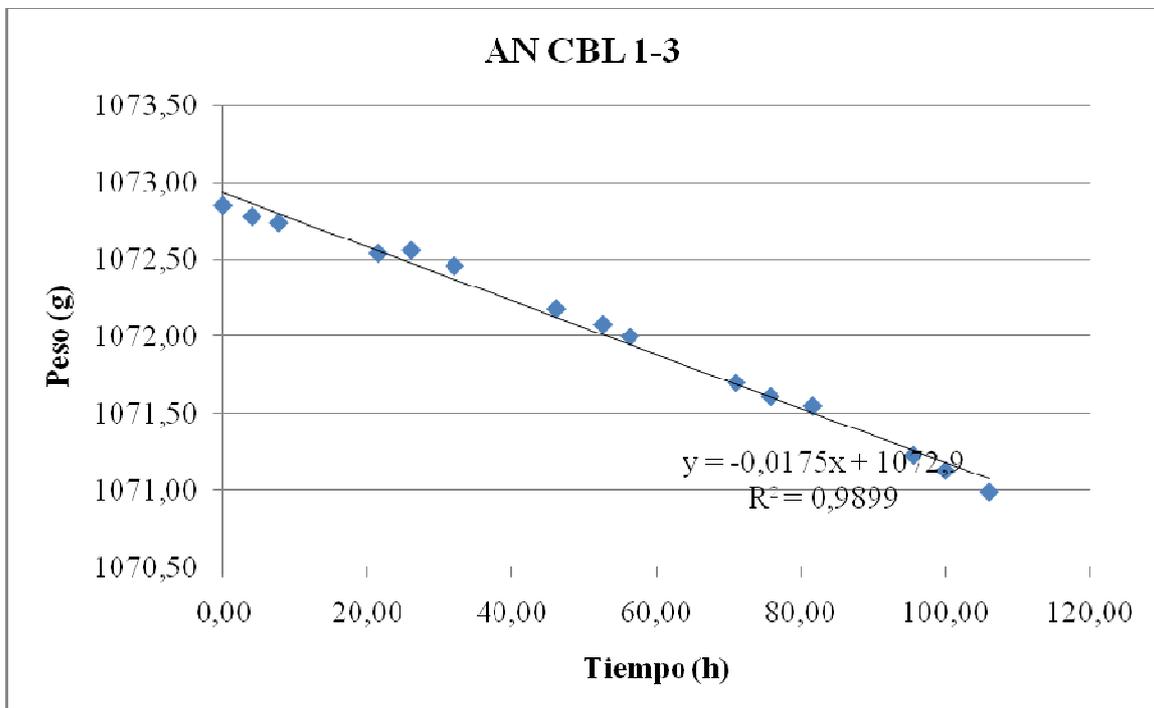


Figura 69: Variación del peso en ensayo de permeabilidad AN CBL 1-3

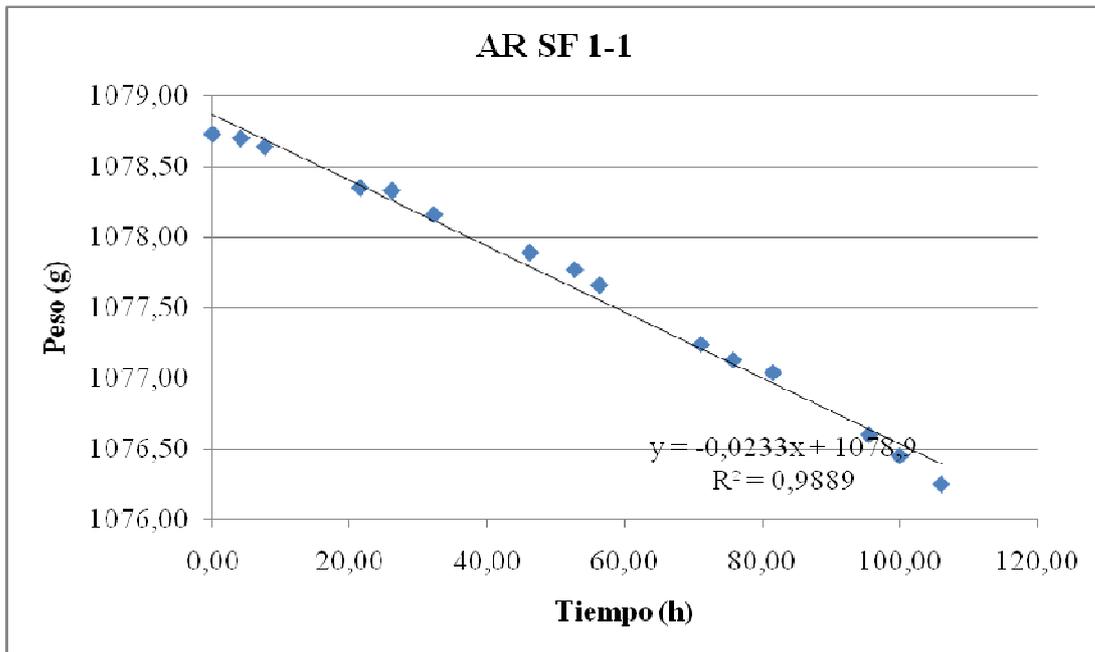


Figura 70: Variación del peso en ensayo de permeabilidad AR SF 1-1

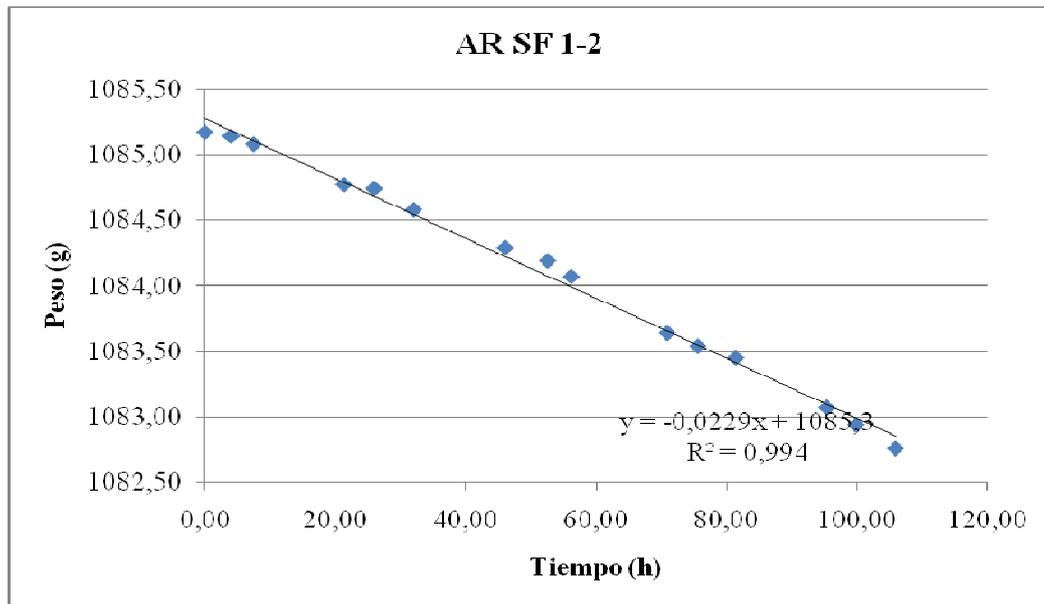


Figura 71: Variación del peso en ensayo de permeabilidad AR SF 1-2

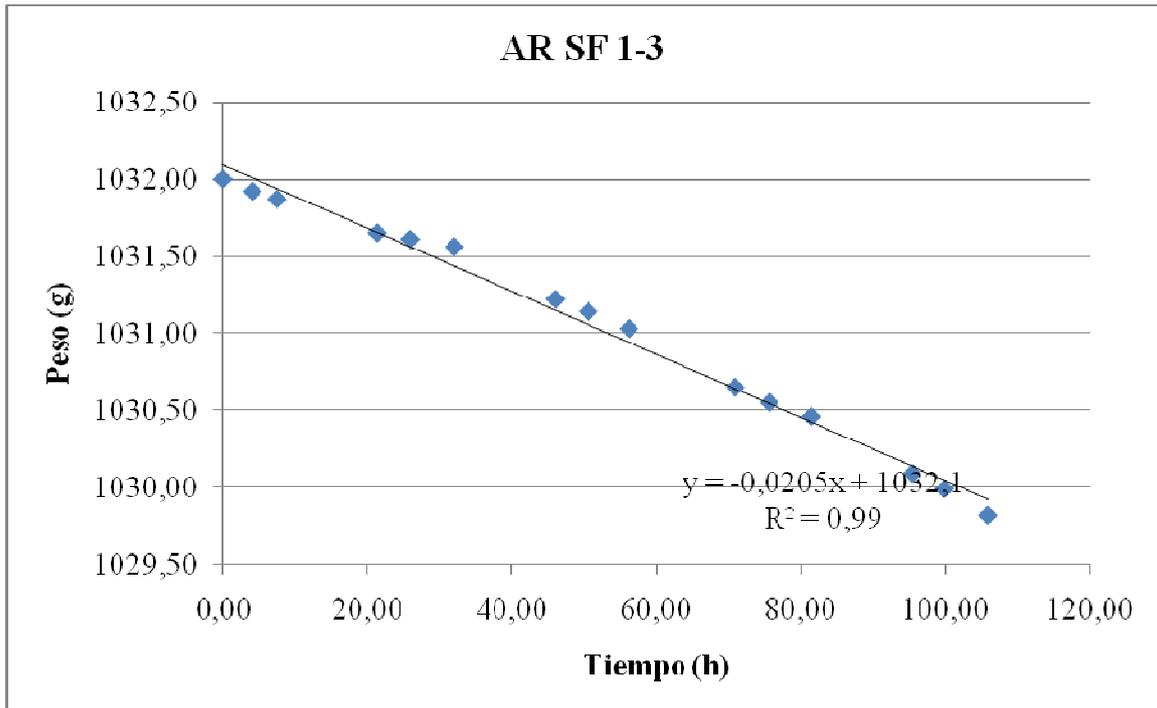


Figura 72: Variación del peso en ensayo de permeabilidad AR SF 1-3

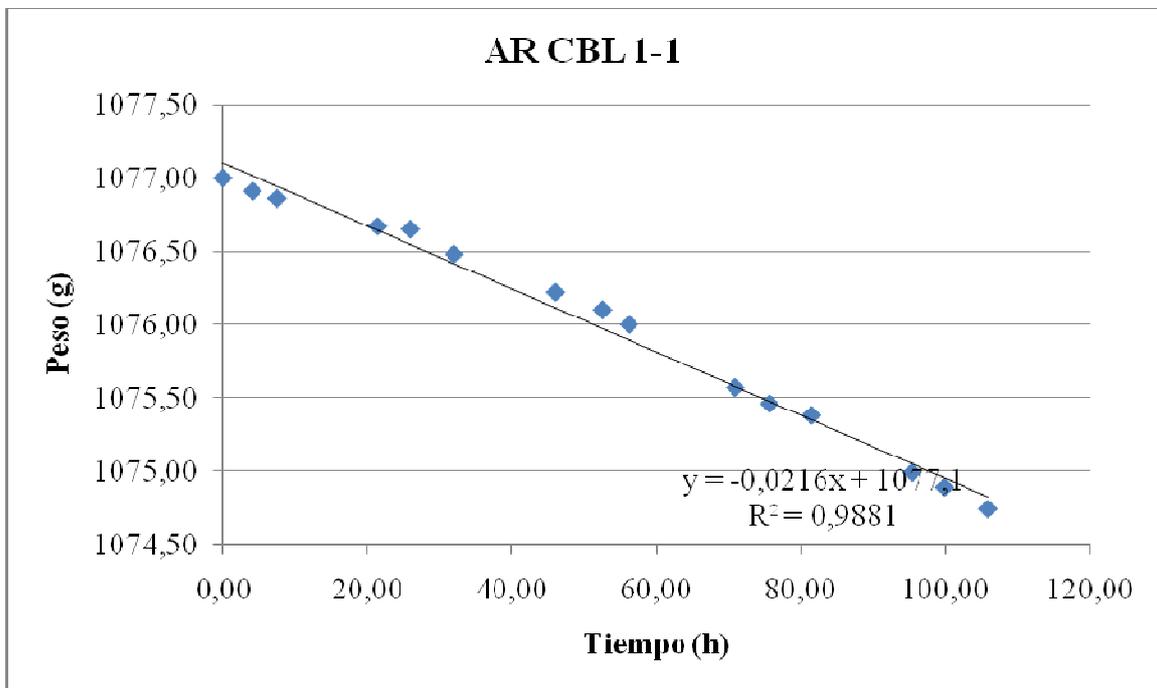


Figura 73: Variación del peso en ensayo de permeabilidad AR CBL 1-1

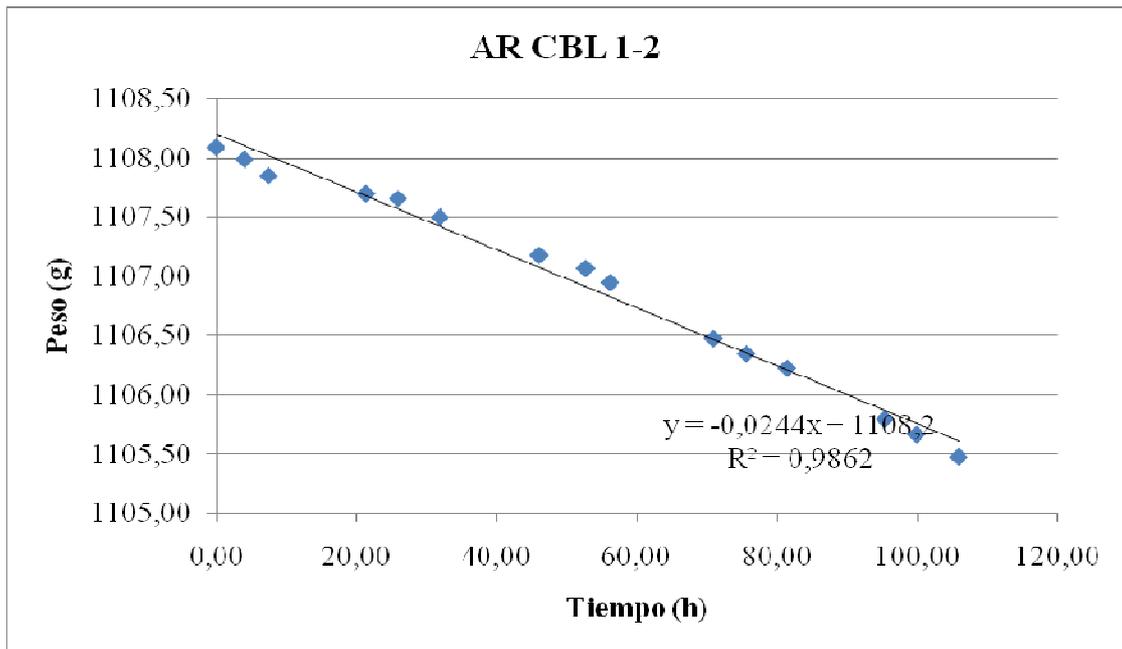


Figura 74: Variación del peso en ensayo de permeabilidad AR CBL 1-2

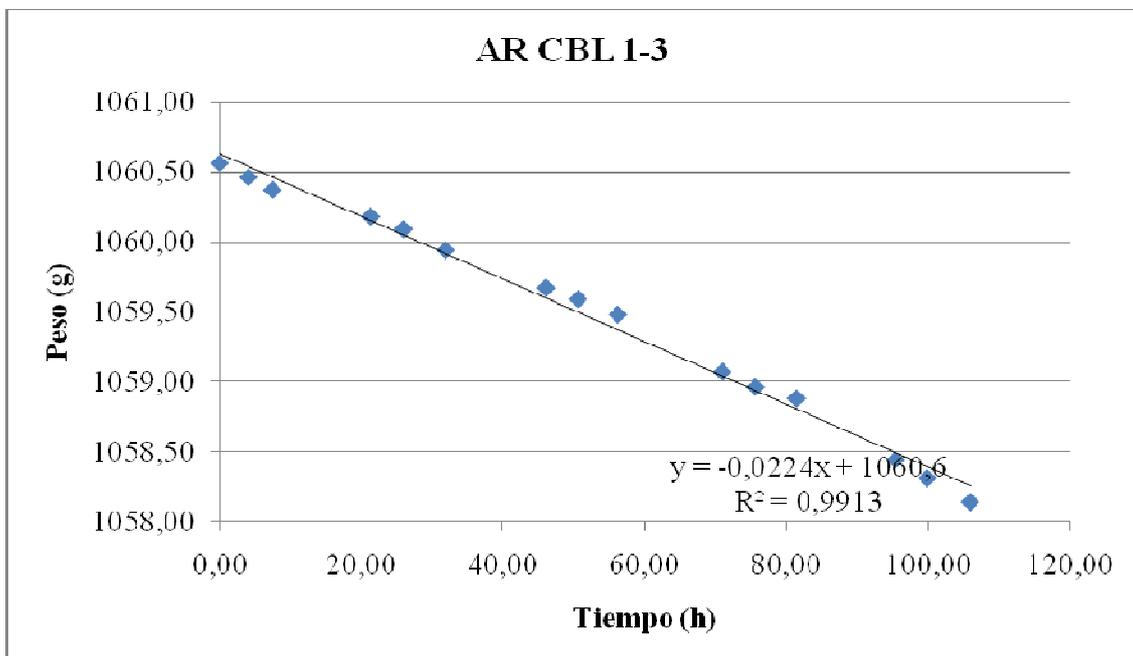


Figura 75: Variación del peso en ensayo de permeabilidad AR CBL 1-3

Tabla 63: Resistencias a Flexión y Compresión de las probetas con cenizas volantes y filler silíceo a los 28 días

PESO (g)	FLEXIÓN (28 días)			COMPRESIÓN (28 días)							Humedad (%)
	Referencia	Fuerza (kN)	Resistencia (Mpa)	Referencia	Fuerza (kN)	Resistencia (Mpa)	Tara	Peso Tara (g)	Peso T+W+S (g)	Peso T+S (g)	
539,45	AN SF 1	2,7369	6,4147	AN SF 1-1	45,221	28,263	AC 06	47,50	237,15	230,52	3,62
				AN SF 1-2	37,737	23,586					
542,75	AN SF 1	2,5876	6,0646	AN SF 1-3	45,071	28,169	AC 2	49,16	269,45	261,66	3,67
				AN SF 1-4	40,908	25,568					
547,61	AN SF 2	3,2883	7,7069	AN SF 2-1	49,657	31,035	AC 22	45,84	271,28	262,99	3,82
				AN SF 2-2	45,263	28,289					
547,99	AN SF 2	3,0045	7,0417	AN SF 2-3	48,557	30,348	AC 30	49,08	259,14	251,52	3,76
				AN SF 2-4	43,881	27,425					
540,36	AN SF 3	2,6708	6,2596	AN SF 3-1	45,259	28,287	AC 34	46,86	274,56	266,73	3,56
				AN SF 3-2	41,376	25,860					
543,79	AN SF 3	2,7599	6,4684	AN SF 3-3	45,624	28,515	AC 11	50,19	265,43	258,08	3,54
				AN SF 3-4	42,892	26,807					
475,78	AR SF 1	2,3472	5,5013	AR SF 1-1	32,306	20,191	AC 39	47,61	226,43	214,89	6,90
				AR SF 1-2	35,558	22,224					
474,93	AR SF 1	2,4214	5,6752	AR SF 1-3	32,562	20,351	AC 32	43,18	236,70	224,29	6,85
				AR SF 1-4	35,558	22,223					
468,85	AR SF 2	2,2221	5,2081	AR SF 2-1	29,323	18,327	AC 04	52,48	239,30	227,51	6,74
				AR SF 2-2	32,666	20,416					
469,52	AR SF 2	2,3115	5,4176	AR SF 2-3	29,213	18,258	AC 03	48,30	225,92	214,73	6,72
				AR SF 2-4	32,835	20,522					
467,02	AR SF 3	1,9410	4,5492	AR SF 3-1	27,775	17,359	AC 01	40,28	221,16	209,65	6,80

				AR SF 3-2	28,926	18,079					
466,63	AR SF 3	2,2547	5,2844	AR SF 3-3	28,493	17,808	AC 38	48,02	231,68	220,13	6,71
				AR SF 3-4	28,751	17,969					
559,59	AN CBL 1	2,4382	5,7146	AN CBL 1-1	35,979	22,487	AC 06	47,50	282,25	270,42	5,31
				AN CBL 1-2	35,127	21,954					
558,73	AN CBL 1	2,5231	5,9134	AN CBL 1-3	36,617	22,885	AC 2	49,16	274,53	262,86	5,46
				AN CBL 1-4	35,303	22,064					
544,98	AN CBL 2	2,9477	6,9087	AN CBL 2-1	31,474	19,671	AC 22	45,84	259,12	248,07	5,46
				AN CBL 2-2	36,798	22,999					
551,72	AN CBL 2	2,2227	5,2095	AN CBL 2-3	31,907	19,942	AC 30	49,08	297,55	284,63	5,49
				AN CBL 2-4	35,680	22,300					
559,43	AN CBL 3	2,3686	5,5515	AN CBL 3-1	36,278	22,674	AC 34	46,86	243,41	233,27	5,44
				AN CBL 3-2	35,296	22,060					
554,50	AN CBL 3	2,6700	6,2579	AN CBL 3-3	36,623	22,889	AC 11	50,19	271,12	259,54	5,53
				AN CBL 3-4	36,594	22,871					
489,38	AR CBL 1	2,8992	6,7949	AR CBL 1-1	38,041	23,776	AC 39	47,61	250,46	234,12	8,76
				AR CBL 1-2	38,880	24,300					
491,14	AR CBL 1	3,1256	7,3256	AR CBL 1-3	37,800	23,625	AC 32	43,18	227,48	212,70	8,72
				AR CBL 1-4	39,628	24,768					

488,34	AR CBL 2	2,6874	6,2985	AR CBL 2-1	38,539	24,087	AC 04	52,48	257,16	240,47	8,88
				AR CBL 2-2	39,287	24,554					
489,65	AR CBL 2	3,0933	7,2500	AR CBL 2-3	39,449	24,656	AC 03	48,30	241,46	225,50	9,01
				AR CBL 2-4	41,849	26,156					
492,88	AR CBL 3	3,0325	7,1075	AR CBL 3-1	38,506	24,066	AC 01	40,28	256,24	238,66	8,86
				AR CBL 3-2	38,415	24,009					
493,46	AR CBL 3	3,0106	7,0562	AR CBL 3-3	37,273	23,296	AC 38	48,02	246,93	231,01	8,70
				AR CBL 3-4	38,652	24,158					

Tabla 64: Resistencias a Flexión y Compresión de las probetas con cenizas volantes y filler silíceo a los 7 días

PESO (g)	FLEXIÓN (7 días)			COMPRESIÓN (7 días)							Humedad (%)
	Referencia	Fuerza (kN)	Resistencia (Mpa)	Referencia	Fuerza (kN)	Resistencia (Mpa)	Tara	Peso Tara (g)	Peso T+W+S (g)	Peso T+S (g)	
563,77	AN CBL 1	1,6516	3,8708	AN CBL 1-1	31,694	19,809	AC 17	59,23	299,16	284,24	6,63
				AN CBL 1-2	29,606	18,504	UCO	61,66	279,54	266,30	6,47
560,87	AN CBL 2	1,8959	4,4435	AN CBL 2-1	32,420	20,262	F 7	56,10	293,99	278,43	7,00
				AN CBL 2-2	31,476	19,673	ME	57,94	248,93	237,46	6,39
557,80	AN CBL 3	1,6945	3,9715	AN CBL 3-1	31,958	19,974	F 24	61,30	247,98	236,93	6,29
				AN CBL 3-2	31,236	19,522	MA	55,53	312,00	296,30	6,52
498,11	AR CBL 1	1,7142	4,0178	AR CBL 1-1	35,129	21,956	F 41	60,77	265,85	245,19	11,20
				AR CBL 1-2	34,374	21,484	F 5	67,41	260,54	241,81	10,74
502,63	AR CBL 2	1,7633	4,1328	AR CBL 2-1	34,996	21,872	AC 19	52,39	254,01	232,05	12,22
				AR CBL 2-2	33,737	21,085	AC 35	43,60	244,41	221,61	12,81
501,96	AR CBL 3	2,1650	5,0742	AR CBL 3-1	35,981	22,488	AC 39	47,61	263,58	240,96	11,70
				AR CBL 3-2	34,963	21,852	AC 28	48,10	244,74	224,02	11,78
543,80	AN SF 1	2,1865	5,1247	AN SF 1-1	40,314	25,196	AC 22	45,84	260,56	250,92	4,70
				AN SF 1-2	34,327	21,454	AC 32	43,18	251,86	243,29	4,28
553,21	AN SF 2	2,2740	5,3297	AN SF 2-1	41,329	25,830	AC 12	48,95	273,12	262,23	5,11
				AN SF 2-2	41,914	26,196	AC 24	50,68	246,71	238,16	4,56

545,12	AN SF 3	2,6088	6,1143	AN SF 3-1	41,797	26,123	AC 01	40,28	253,88	243,97	4,87
				AN SF 3-2	36,372	22,733	AC 2	49,16	253,75	245,47	4,22
484,32	AR SF 1	1,8915	4,4333	AR SF 1-1	30,694	19,184	AC 210	46,87	266,15	248,71	8,64
				AR SF 1-2	31,266	19,541	AC 34	46,86	214,85	200,21	9,55
479,33	AR SF 2	1,9430	4,5540	AR SF 2-1	27,826	17,391	AC 44	49,91	245,64	230,47	8,40
				AR SF 2-2	28,460	17,787	AC 23	46,24	227,54	211,69	9,58
473,54	AR SF3	1,7553	4,1139	AR SF 3-1	26,876	16,797	AC 25	52,62	251,56	235,48	8,79
				AR SF 3-2	27,692	17,308	AC 40	48,93	241,54	224,63	9,62

Tabla 65: Resistencias a Flexión y Compresión de las probetas con agua potable y cemento CEM II/B-L32.5 N

PESO (g)	FLEXIÓN (28 días)			COMPRESIÓN (28 días)							Humedad (%)
	Referencia	Fuerza (kN)	Resistencia (Mpa)	Referencia	Fuerza (kN)	Resistencia (Mpa)	Tara	Peso Tara (g)	Peso T+W+S (g)	Peso T+S (g)	
493,33	80/0 Cem II	1,7358	4,0684	AP CII 80 1-1	15,173	9,483	AC 14	49,37	255,29	250,42	2,42
				AP CII 80 1-2	16,337	10,211	AC 34	46,86	257,2	252,42	2,33
497,71	80/0 Cem II	1,5769	3,6958	AP CII 80 2-1	15,052	9,408	AC 07	52,85	278,99	273,69	2,40
				AP CII 80 2-2	15,512	9,757	AC 13	48,76	208,53	204,83	2,37
491,97	80/0 Cem II	1,5598	3,6558	AP CII 80 3-1	14,88	9,3	AC 03	48,3	279,52	274,13	2,39
				AP CII 80 3-2	15,007	9,379	AC 06	47,5	230,16	225,91	2,38
512,58	90/0 Cem II	1,8473	4,3297	AP CII 90 1-1	19,437	12,148	AC 26	46,62	261,97	256,52	2,60
				AP CII 90 1-2	19,739	12,337	AC 25	52,62	254,08	249,18	2,49
508,48	90/0 Cem II	1,9788	4,6379	AP CII 90 2-1	20,585	12,866	AC 36	45,44	252,89	247,75	2,54
				AP CII 90 2-2	19,394	12,122	AC 22	45,84	234,62	229,94	2,54
509,19	90/0 Cem II	1,9679	4,6123	AP CII 90 3-1	20,533	12,833	AC 40	48,93	250,52	245,34	2,64
				AP CII 90 3-2	20,881	13,051	AC 37	43,4	254,4	249,03	2,61
511,77	100/0 Cem II	2,2664	5,3118	AP CII 100 1-1	21,766	13,604	AC 211	51,73	276,98	271,42	2,53

				AP CII 100 1-2	23,876	14,923	AC 2	49,16	230,09	225,69	2,49
511,48	100/0 Cem II	1,9812	4,6435	AP CII 100 2-1	21,388	13,368	AC 01	40,28	241,24	236,4	2,47
				AP CII 100 2-2	21,935	13,709	AC 24	50,68	289,72	284,14	2,39
510,08	100/0 Cem II	1,8201	4,2659	AP CII 100 3-1	19,941	12,463	AC210	46,87	254,35	249,63	2,33
				AP CII 100 3-2	20,363	12,727	AC 23	46,24	243,97	239,6	2,26

Tabla 66: Resistencias a Flexión y Compresión de las probetas con agua potable y cemento CEM I 52.5 R

PESO (g)	FLEXIÓN (28 días)			COMPRESIÓN (28 días)							Humedad (%)
	Referencia	Fuerza (kN)	Resistencia (Mpa)	Referencia	Fuerza (kN)	Resistencia (Mpa)	Tara	Peso Tara (g)	Peso T+W+S (g)	Peso T+S (g)	
513,48	80/0 Cem I	1,7871	4,1885	AP CI 80 1-1	21,13	13,206	AC 14	49,37	265,62	260,05	2,64
				AP CI 80 1-2	20,912	13,07	AC 34	46,86	259,03	253,7	2,58
515,41	80/0 Cem I	1,5321	3,5909	AP CI 80 2-1	20,324	12,702	AC 07	52,85	290,91	285,2	2,46
				AP CI 80 2-2	19,82	12,387	AC 13	48,76	253,5	248,71	2,40
514,56	80/0 Cem I	1,7442	4,0879	AP CI 80 3-1	20,083	12,552	AC 03	48,3	245,17	240,19	2,60
				AP CI 80 3-2	20,662	12,914	AC 06	47,5	258,56	253,33	2,54
495,24	90/0 Cem I	2,1659	5,0762	AP CI 90 1-1	26,546	16,591	AC 26	46,62	231,36	226,45	2,73
				AP CI 90 1-2	26,744	16,715	AC 25	52,62	265,79	260,21	2,69
494,56	90/0 Cem I	2,1819	5,1137	AP CI 90 2-1	23,843	14,902	AC 36	45,44	242,72	237,76	2,58
				AP CI 90 2-2	25,394	15,871	AC 22	45,84	236,93	232,07	2,61
495,54	90/0 Cem I	2,0034	4,6955	AP CI 90 3-1	27,023	16,89	AC 40	48,93	255,59	250,21	2,67
				AP CI 90 3-2	26,035	16,272	AC 37	43,4	218,88	214,36	2,64
499,85	100/0 Cem I	2,2491	5,2713	AP CI 100 1-1	31,115	19,447	AC 211	51,73	267,67	261,36	3,01
				AP CI 100 1-2	29,238	18,274	AC 2	49,16	210,56	205,96	2,93
501,5	100/0 Cem I	2,1288	4,9893	AP CI 100 2-1	21,686	13,554	AC01	40,28	238,26	232,6	2,94
				AP CI 100 2-2	31,16	19,475	AC 24	50,68	218,86	214,25	2,82
501,27	100/0 Cem I	1,9768	4,633	AP CI 100 3-1	30,266	18,916	AC 210	46,87	249,39	243,43	3,03
				AP CI 100 3-2	28,526	17,829	AC 23	46,24	225,68	220,52	2,96

Tabla 67: Resistencias a Flexión y Compresión de las probetas con agua residual y cemento CEM I 52.5 R

PESO (g)	FLEXIÓN (28 días)			COMPRESIÓN (28 días)							Humedad (%)
	Referencia	Fuerza (kN)	Resistencia (Mpa)	Referencia	Fuerza (kN)	Resistencia (Mpa)	Tara	Peso Tara (g)	Peso T+W+S (g)	Peso T+S (g)	
475,1	80/0 Cem I	1,5896	3,7257	AV CI 80 1-1	16,252	10,158	AC39	47,61	251,67	246,45	2,63
				AV CI 80 1-2	15,455	9,66					
478,07	80/0 Cem I	1,6795	3,9363	AV CI 80 2-1	18,051	11,282	AC 34	51,57	247,09	241,9	2,73
				AV CI 80 2-2	16,512	10,32					
475,36	80/0 Cem I	1,7331	4,062	AV CI 80 3-1	17,67	11,044	AC 01	40,28	219,93	215,28	2,66
				AV CI 80 3-2	16,31	10,194					
488,21	90/0 Cem I	1,7569	4,1176	AV CI 90 1-1	24,542	15,339	AC 02	45,81	263,02	256,76	2,97
				AV CI 90 1-2	22,595	14,122					
488,4	90/0 Cem I	2,0476	4,799	AV CI 90 2-1	24,692	15,433	AC 32	43,18	267,37	260,6	3,11
				AV CI 90 2-2	22,578	14,111					
491,78	90/0 Cem I	1,8905	4,4308	AV CI 90 3-1	26,478	16,549	AC 2	49,16	250,67	244,63	3,09
				AV CI 90 3-2	22,864	14,29					
495,21	100/0 Cem I	2,0756	4,8647	AV CI 100 1-1	32,358	20,224	AC 22	45,84	234,19	228,14	3,32
				AV CI 100 1-2	29,971	18,732					
498,69	100/0 Cem I	2,2305	5,2278	AV CI 100 2-1	32,723	20,452	AC 210	46,87	244,41	238,06	3,32
				AV CI 100 2-2	29,197	18,248					
497,11	100/0 Cem I	2,1228	4,9753	AV CI 100 3-1	30,625	19,14	AC 34	46,87	253,62	246,93	3,34
				AV CI 100 3-2	27,873	17,421					

Tabla 68: Resistencias a Flexión y Compresión de las probetas con agua residual y cemento CEM II/B-L 32.5 N

PESO (g)	FLEXIÓN (28 días)			COMPRESIÓN (28 días)							Humedad (%)
	Referencia	Fuerza (kN)	Resistencia (Mpa)	Referencia	Fuerza (kN)	Resistencia (Mpa)	Tara	Peso Tara (g)	Peso T+W+S (g)	Peso T+S (g)	
496,56	80/0 Cem II	1,1954	2,8018	AV CII 80 1-1	13,452	8,407	AC30	49,08	249,3	245,19	2,10
				AV CII 80 1-2	11,978	7,487					
494,7	80/0 Cem II	1,1938	2,798	AV CII 80 2-1	12,2	7,625	AC 1	44,27	269,12	264,62	2,04
				AV CII 80 2-2	10,463	6,539					
499,91	80/0 Cem II	1,2597	2,9524	AV CII 80 3-1	13,026	8,141	AC 11	50,19	261,91	257,62	2,07
				AV CII 80 3-2	11,715	7,322					
502,55	90/0 Cem II	1,5704	3,6807	AV CII 90 1-1	16,353	10,221	AC 38	48,02	265,72	261,13	2,15
				AV CII 90 1-2	16,125	10,078					
500,14	90/0 Cem II	1,4629	3,4288	AV CII 90 2-1	15,374	9,609	AC 23	46,24	256,96	252,48	2,17
				AV CII 90 2-2	14,447	9,029					
499,5	90/0 Cem II	1,5363	3,6007	AV CII 90 3-1	16,399	10,249	AC 04	52,48	261,34	256,87	2,19
				AV CII 90 3-2	16,255	10,16					

509,2	100/0 Cem II	1,5923	3,732	AV CII 100 1-1	20,113	12,57	AC 24	50,68	285,38	280,29	2,22
				AV CII 100 1-2	18,353	11,471					
508,64	100/0 Cem II	1,5555	3,6457	AV CII 100 2-1	19,784	12,365	AC 35	43,6	249,65	244,99	2,31
				AV CII 100 2-2	18,828	11,768					
509,97	100/0 Cem II	1,7441	4,0876	AV CII 100 3-1	19,634	12,272	AC 03	48,3	248,06	243,44	2,37
				AV CII 100 3-2	18,828	11,766					

Tabla 69: Dosificaciones de las amasadas que evalúan la influencia de cenizas volantes de biomasa

AMASADA	TIPO DE MORTERO	CEMENTO (g)	FILLER (g)	CENIZAS VOLANTES (g)	ARENA NATURAL (g)	RCD (g)	AGUA (g)	CONSISTENCIA (mm)		C. Media (mm)
1	AN SF	672	280		3398		556	180	185	183
								185	180	
2	AN SF	672	280		3398		550	180	184	182
								180	182	
3	AN SF	672	280		3398		550	175	180	178
								180	175	
4	AR SF	672	280			3113	692	173	176	175
								174	176	
5	AR SF	672	280			3113	690	171	177	176
								179	177	
6	AR SF	672	280			3113	690	175	177	177
								177	178	
7	AN CBL	672		236	3398		509	175	172	172
								169	170	
8	AN CBL	672		236	3398		509	170	168	168
								169	165	
9	AN CBL	672		236	3398		509	172	170	170
								167	171	
10	AR CBL	672		236		3113	618	172	172	172
								170	175	
11	AR CBL	672		236		3113	618	182	179	178
								173	176	

12	AR CBL	672		236		3113	618	170	170	171
								172	171	

Tabla 70: Dosificaciones de las amasadas que evalúan la influencia del agua residual

AMASADA	TIPO DE MORTERO	CEMENTO (g)		AGUA		ARENA (g)	CONSISTENCIA (mm)		C. Media (mm)
		CEM I	CEM II	POTABLE	RESIDUAL				
1	CEM II AR 100/0		720		576	3656	170	170	168
							166	166	
2	CEM II AR 90/0		648		578	3656	170	177	174
							176	174	
3	CEM II AR 80/0		576		573	3656	165	170	167
							168	166	
4	CEM I AR 100/0	720			556	3656	178	178	179
							182	177	
5	CEM I AR 90/0	648			553	3656	172	167	169
							165	173	
6	CEM I AR 80/0	576			554	3656	167	175	173
							178	170	
7	CEM I AP 100/0	720		554		3617	167	168	167
							167	165	
8	CEM I AP 90/0	648		554		3617	170	168	167
							162	167	
9	CEM I AP 80/0	576		554		3617	180	177	177
							172	178	
10	CEM II AP 100/0		720		576	3617	177	180	178
							178	177	
11	CEM II AP 90/0		648		569	3617	170	168	167
							162	167	

12	CEM II AP 80/0		576		560	3617	180	177	177
							172	178	

