

**UTILIZACIÓN DE VIDRIO RECICLADO
EN MORTEROS**

**DANNY FERNANDO ARCINIEGAS LÓPEZ
ALEXANDER FONSECA CRISTANCHO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2004

**UTILIZACIÓN DE VIDRIO RECICLADO
EN MORTEROS**

**DANNY FERNANDO ARCINIEGAS LÓPEZ
ALEXANDER FONSECA CRISTANCHO**

**Trabajo de Grado presentado como requisito
para optar al Título de Ingeniero Civil**

Director

**RICARDO ALFREDO CRUZ HERNÁNDEZ
Ingeniero Civil Ph.D.**

Co-director

**CUSTODIO VÁSQUEZ QUINTERO
Ingeniero Metalúrgico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2004

DEDICATORIA

Con mucho amor dedico éste trabajo, a aquellas personas que de diversas formas colaboraron y lo hicieron posible, como mis padres por su comprensión, a Lenys por su cariño y a Alex por su Paciencia.

DANNY FERNANDO ARCINIEGAS LÓPEZ

DEDICATORIA

A JEHOVA por darme el invaluable don de existir.

A mis padres por el esfuerzo y apoyo a lo largo de toda mi vida.

A mis hermanos, Hilda y Nelson, que siempre han estado estado a mi lado.

A mi novia y amiga, Mayerling por su constante ayuda y apoyo.

Al señor Alirio y la señora Patricia por su colaboración y amistad.

A todas aquellas personas que de una u otra forma me aportarán su ayuda para lograr la consecución de mis metas.

ALEXANDER FONSECA CRISTANCHO.

RESUMEN

TÍTULO: UTILIZACION DE VIDRIO RECICLADO EN MORTEROS".*

AUTORES: FONSECA CRISTANCHO ALEXANDER, ARCINIEGAS LOPEZ DANNY FERNANDO.

PALABRAS CLAVES: Morteros, vidrios, contaminación ambiental, evaluación de propiedades físico-mecánicas.

El uso de materiales reciclables en la ingeniería se ha presentado como una alternativa, no sólo para contrarrestar el grave problema de la contaminación ambiental, sino también para modificar las propiedades de materiales como el mortero. Teniendo en cuenta la elevada acumulación de residuos de envases de vidrio en nuestro medio, se brinda la posibilidad de darle un nuevo uso como el de reemplazar parte del agregado fino de los morteros por partículas vidrio, con el fin de evaluar algunas propiedades físico-mecánicas y su desempeño en ambientes agresivos.

El deterioro en el mortero se debe a acciones físicas, mecánicas o químicas, las cuales están relacionadas con las características del mortero, sus componentes, el proceso de elaboración, fraguado, curado y el medio ambiente a los que será sometido.

El estudio revela que al adicionar partículas de vidrio estabilizado con estireno a las mezclas de mortero, aumenta las propiedades mecánicas de compresión, flexión y tracción y además, las propiedades como la absorción capilar, la resistencia al ataque de sulfatos, la permeabilidad, la porosidad y la difusión al ion cloruro mejoran sustancialmente con respecto al mortero normal, dándole grandes ventajas a este nuevo material a la hora de utilizarse en la industria de la construcción en especial por su durabilidad y resistencia ante ambientes agresivos.

SUMMARY

TITLE: "THE USE OF GLASS RECYCLED IN MORTAR ".*

AUTHORS: FONSECA CRISTANCHO ALEXANDER, ARCINIEGAS LOPEZ DANNY FERNANDO.**

PALABRAS CLAVES: Mortar, glass, problem of the environmental, evaluation physical mechanical properties.

The use of recycled materials in the engineering has been an alternative not only To counteract the serious problem of the environmental contamination but also to change the characteristics of some materials as the mortar. Having into account the high amount of residues of glass containers in our environment, it is offert the possibility of giving it a new use as that one of replacing part of the fine aggregate of the mortars by glass particles. This is with the goal of evaluating some physic-mechanical characteristics and their performance in aggressive environment.

The mortar deterioration is due to some physical mechanical or chemical actions, which are related to the characteristics, the components, the manufacturing, forging and curing processes as well as to the environment it will be submitted.

The present work reveals that when adding stabilized glass particles with Styrene to the mixtures of mortar, it increases the mechanical characteristics of compression, bending and traction. Besides, some characteristics such as the capillary absorption, the resistance to the sulphates attack, the permeability, the porosity and the diffusion to the ion chloride may improve significantly in relation to the normal mortar. That gives great advantages to the news material to be used in the industry of construction especially, for its durability and resistance in aggressive environments.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág
INTRODUCCIÓN	
1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	3
1.1 OBJETIVO GENERAL	3
1.1.1 Objetivos Específicos	3
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
2. MARCO TEÓRICO	7
2.1 MORTEROS	7
2.1.1 Definición	7
2.1.2 Propiedades del Mortero	7
2.1.2.1 Propiedades del Mortero en Estado Plástico	7
2.1.3 Clasificación de los Morteros	10
2.2 TIPOS DE CORROSIÓN QUE AFECTAN LA DURABILIDAD DE UN MORTERO.	12
2.2.1 Corrosión Externa	12
2.2.2 Corrosión Interna	13
2.2.3 Ataques al Mortero por Parte del Medio Ambiente	13
2.3 EL VIDRIO	14
2.3.1 Definición del Vidrio	14
2.3.2 Reseña Histórica del Vidrio	14
2.3.3 Estructura del Vidrio	16
2.3.4 Composición Química del Vidrio	17
2.3.5 Propiedades del Vidrio	18
2.3.6 Proceso de Fabricación del Vidrio	19
2.3.7 Usos y Clasificación del Vidrio	20

2.3.8	El Problema de los Residuos de Vidrio	22
2.3.9	Reutilización del Vidrio Reciclado	22
2.3.9.1	Aplicación de Residuos de Vidrio en Ingeniería Civil	23
3	ETAPA EXPERIMENTAL	24
3.1	DISEÑO DE LA MEZCLA DE MORTERO	24
3.1.1	Selección, Caracterización y Adecuación de los Materiales	24
3.2	DISEÑO DE MEZCLA	34
3.3	PRUEBAS DE LABORATORIO	38
3.3.1	Ensayo para Determinar la Reactividad Potencial de los Agregados	39
3.3.2	Ensayo de Compresión	48
3.3.3	Ensayo de flexión	49
3.3.4	Ensayo de tracción	50
3.3.5	Ensayo de porosidad	51
3.3.6	Ensayo de permeabilidad	54
3.3.7	Ensayo de Absorción Capilar	56
3.3.8	Ensayo de Solidez Bajo la Acción de Sulfatos	58
3.3.9	Ensayo para Determinar el Coeficiente de Difusión y la Permeabilidad al Anión Cloruro.	59
4	ADECUACIÓN DEL VIDRIO	65
4.1	Reacción Alkali-Sílice	65
4.1.2	Consecuencias de la R.A.S.	66
4.2	MÉTODO QUÍMICO PARA DETERMINAR LA REACTIVIDAD POTENCIAL DEL VIDRIO.	67
4.3	ESTABILIZACIÓN DEL VIDRIO MEDIANTE LA IMPREGNACIÓN DE ESTIRENO.	72
4.3.1	El Estireno	73
4.3.2	Estabilización del Vidrio con Estireno	76
5	PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	85
5.1	Ensayo de Compresión	85
5.2	Ensayo de Flexión	92
5.3	Ensayo de Tracción	99
5.4	Ensayo de Porosidad	106
5.5	Ensayo de Permeabilidad	109
5.6	Ensayo de Absorción Capilar	112
5.7	Ensayo de Solidez Bajo la Acción de Sulfatos	118
5.8	Ensayo para Determinar el Coeficiente de Difusión	

y la Permeabilidad al Anión Cloruro.	122
CONCLUSIONES	131
RECOMENDACIONES	135
BIBLIOGRAFÍA	138
ANEXOS	142

LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1. Disponibilidad de residuos sólidos en Bucaramanga	5
Tabla 2. Datos recicladoras de la ciudad de Bucaramanga	6
Tabla 3. Aplicaciones de Morteros según su Fluidéz	8
Tabla 4. Factores de Degradación del Concreto y Mortero.	10
Tabla 5. Usos de los Morteros de Cemento	11
Tabla 6. Datos para la Gráfica de Consistencia del Cemento	25
Tabla 7. Granulometría de la Arena	29
Tabla 8. Ensayo de Gravedades Específicas	32
Tabla 9. Relación entre % de Fluidéz y Relación a/c	35
Tabla 10. Contenido de Materiales por Metro Cúbico	36
Tabla 11. Proporciones para Mezclas de Mortero con 10% de Vidrio	37
Tabla 12. Proporciones para Mezclas de Mortero con 20% de Vidrio	37
Tabla 13. Proporciones para Mezclas de Mortero con 30% de Vidrio	37
Tabla 14. Nomenclatura de las Mezclas de Mortero	38
Tabla 15. Ensayos Realizados durante la Investigación	38
Tabla 16. Datos Rc para el vidrio sin tratar	69
Tabla 17. Datos Sc para el vidrio sin tratar	70
Tabla 18. Datos Rc para el vidrio sin tratar	82
Tabla 19. Datos Sc para el vidrio sin tratar	83

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1.Composición Química del vidrio	17
Gráfica 2. Consistencia del Cemento	25
Gráfica 3. Granulometría Arena utilizada	30
Gráfica 4. Relación entre % de Fluidez y Relación A/C	35
Gráfica 5. Sílice Disuelta Vs. Reducción Alcalina para el Vidrio sin tratar	71
Gráfica 6. Polimerización del estireno	74
Gráfica 7. Estructura del estireno	74
Gráfica 8. Sílice Disuelta Vs. Reducción Alcalina para el Vidrio Tratado	84
Gráfica 9. Resistencia a la Compresión vs. Tiempo para el tamaño R-30	87
Gráfica 10. Resistencia a la Compresión vs. Tiempo para el Tamaño R-50	87
Gráfica 11. Resistencia a la Compresión vs. Tiempo para el Tamaño R-100	88
Gráfica 12. Resistencia a la Compresión vs. Contenido de Vidrio a los 7 días	88
Gráfica 13. Resistencia a la Compresión vs. Contenido de Vidrio a los 14 días	89
Grafica14. Resistencia a la Compresión vs. Contenido de Vidrio a los 28 días	89
Gráfica 15. Variación de la Resistencia a la Compresión a los 7 días	90
Gráfica 16. Variación de la Resistencia a la Compresión a los 14 días	91
Gráfica 17. Variación de la Resistencia a la Compresión a los 28 días	91
Gráfica 18. Resistencia a la Flexión vs. Tiempo para el Tamaño R-30	94
Gráfica 19. Resistencia a la Flexión vs. Tiempo para el Tamaño R-50	94
Gráfica 20. Resistencia a la Flexión vs. Tiempo para el Tamaño R-100	95
Gráfica 21. Resistencia a la Flexión vs. Contenido de Vidrio a los 7 días	95
Grafica 22. Resistencia a la Flexión vs. Contenido de Vidrio a los 14 días	96
Gráfica 23. Resistencia a la Flexión vs. Contenido de Vidrio a los 28 días	96
Gráfica 24. Variación de la Resistencia a la Flexión a los 7 días	97
Gráfica 25. Variación de la Resistencia a la Flexión a los 14 días	98
Gráfica 26. Variación de la Resistencia a la Flexión a los 28 días	98
Gráfica 27. Resistencia a la Tracción vs. Tiempo para el Tamaño R-30	101
Gráfica 28. Resistencia a la Tracción vs. Tiempo para el Tamaño R-50	101
Gráfica 29. Resistencia a la Tracción vs. Tiempo para el Tamaño R-100	102
Gráfica 30. Resistencia a la Tracción vs. Contenido de Vidrio a los 7 días	102
Gráfica 31. Resistencia a la Tracción vs. Contenido de Vidrio a los 14 días	103
Gráfica 32. Resistencia a la Tracción vs. Contenido de Vidrio a los 28 días	103
Gráfica 33. Variación de la Resistencia a la Tracción a los 7 días	104
Gráfica 34. Variación de la Resistencia a la Tracción a los 14 días	105
Gráfica 35. Variación de la Resistencia a la Tracción a los 28 días	105
Gráfica 36. Valores de Porosidad vs. Contenido de Vidrio	107
Gráfica 37. Valores de Porosidad para cada uno de los Tipos de Mortero	107
Gráfica 38. Porcentaje de Variación de la Porosidad	108
Gráfica 39. Valores de Permeabilidad vs. Contenido de Vidrio	110
Gráfica 40. Valores de Permeabilidad para cada uno de los Tipos de Mortero	110

Gráfica 41. Porcentaje de Variación de la Permeabilidad	111
Gráfica 42. Absorción Capilar por unidad de área vs. Tiempo para Tamaño R-30	114
Gráfica 43. Absorción Capilar por unidad de área vs. Tiempo para Tamaño R-50	114
Gráfica 44. Absorción Capilar por unidad de área vs. Tiempo para Tamaño R-100	115
Gráfica 45. Valores de Resistencia a la Penetración del Agua (m)c/u de los morteros.	115
Gráfica 46. Valores del Coeficiente de Absorción Capilar (k) de c/u de los Morteros.	116
Gráfica 47. Valores de Porcentaje de Porosidad (e) de cada Tipo de Mortero	116
Gráfica 48. Valores de Absortividad (S) de cada Tipo de Mortero	117
Gráfica 49. Desgaste por Sulfatos a los 7 ciclos vs. Contenido de Vidrio	120
Gráfica 50. Desgaste por Sulfatos a los 7 ciclos de cada uno de los tipos de mortero	120
Gráfica 51. Porcentaje de Variación del Desgaste por Sulfatos	122
Gráfica 52. Concentración vs. Tiempo para el Tamaño R-30	124
Gráfica 53. Concentración vs. Tiempo para el Tamaño R-50	125
Gráfica 54. Concentración vs. Tiempo para el Tamaño R-100	125
Gráfica 55. Valores de Coeficiente de Difusión	127
Gráfica 56. Corriente vs. Tiempo para el Tamaño R-30	128
Gráfica 57. Corriente vs. Tiempo para el Tamaño R-50	129
Gráfica 58. Corriente vs. Tiempo para el Tamaño R-100	129
Gráfica 59. Valores de Permeabilidad al Ion Cloruro	130

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

	Pag.
Fotografía 1. Arena empleada en los ensayos.	27
Fotografía 2. Serie de Tamices utilizados en el proyecto.	29
Fotografías 3 y 4. Prueba de materia orgánica.	31
Fotografía 5. Ensayo de gravedad específica.	31
Fotografía 6. Molino de quijadas.	33
Fotografías 7 y 8. Molino de bandas.	33
Fotografías 9 y 10. Molino de discos.	34
Fotografía 11. Tamizadora.	34
Fotografía 12. Mesa de Flujo.	35
Fotografía 13. Molino de Quijadas.	41
Fotografía 14. Muestra de vidrio molido.	42
Fotografía 15. Muestras de vidrio para prueba de reactividad alcalina.	43
Fotografía 16. Introducción de las muestras al horno.	44
Fotografía 17. Titulación de las muestras.	47
Fotografía 18. Titulación de las muestras.	47
Fotografía 19 y 20. Máquina Universal de Ensayos TREBEL.	48
Fotografía 21. Montaje Ensayo de Flexión.	49
Fotografía 22. Montaje Ensayo de Tracción.	51
Fotografía 23. Porosímetro de Campo Ruska.	51
Fotografía 24 y 25. Permeámetro de Gas Ruska.	54
Fotografía 26. Probetas cúbicas Ensayo de Permeabilidad.	55
Fotografía 27. Montaje Ensayo de Absorción Capilar.	58
Fotografías 28 y 29. Montaje Ensayo de Solidez a Sulfatos.	59
Fotografía 30. Montaje Prueba Rápida de Permeación a Cloruros.	61
Fotografía 31 y 32. Soluciones Utilizadas Prueba de Difusión de Cloruros.	64
Fotografía 33. Método de impregnación.	77
Fotografía 34. Procedimiento de impregnación.	78
Fotografías 35 y 36. Apariencia del vidrio sin estabilizar y estabilizado.	79
Fotografía 37. Moldes para compresión, flexión y tracción.	85
Fotografías 38 y 39. Probetas en curado y probetas de compresión.	86
Fotografías 40 y 41. Probeta sometida a compresión y probeta fallada.	86
Fotografías 42 y 43. Ensayo de las probetas a flexión.	92
Fotografías 44 y 45. Las probetas completamente falladas.	93
Fotografías 46 y 47. Ensayo de las probetas de tracción.	99
Fotografías 48 y 49. Detalle de las probetas del ensayo de tracción.	100
Fotografías 50 y 51. Porosímetro de campo Ruska y probetas de porosidad.	106
Fotografías 52 y 53. Permeámetro de campo Ruska y ensayos de laboratorio.	109
Fotografía 54. Probetas ensayo de absorción capilar.	113
Fotografías 55 y 56. Montaje del ensayo de absorción capilar.	113
Fotografías 57 y 58. Probetas iniciales y finales en el ensayo de sulfatos.	118
Fotografías 59 y 60. Prueba de solidez bajo la acción de sulfatos.	119

Fotografías 61 y 62. En detalle ensayo solidez bajo la acción de sulfatos.	119
Fotografías 63, 64. Montaje del ensayo al ión cloruro.	123
Fotografías 65. Montaje del ensayo al ión cloruro.	124

ANEXOS

TABLAS DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE COMPRESIÓN

Anexo 1. Resultados Ensayo de Compresión Mortero Normal

Anexo 2. Resultados Ensayo de Compresión R-30 10%

Anexo 3. Resultados Ensayo de Compresión R-30 20%

Anexo 4. Resultados Ensayo de Compresión R-30 30%

Anexo 5. Resultados Ensayo de Compresión R-50 10%

Anexo 6. Resultados Ensayo de Compresión R-50 20%

Anexo 7. Resultados Ensayo de Compresión R-50 30%

Anexo 8. Resultados Ensayo de Compresión R-100 10%

Anexo 9. Resultados Ensayo de Compresión R-100 20%

Anexo 10. Resultados Ensayo de Compresión R-100 30%

TABLAS DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE FLEXIÓN

Anexo 11. Resultados Ensayo de Flexión Normal

Anexo 12. Resultados Ensayo de Flexión R-30 10%

Anexo 13. Resultados Ensayo de Flexión R-30 20%

Anexo 14. Resultados Ensayo de Flexión R-30 30%

Anexo 15. Resultados Ensayo de Flexión R-50 10%

Anexo 16. Resultados Ensayo de Flexión R-50 20%

Anexo 17. Resultados Ensayo de Flexión R-50 30%

Anexo 18. Resultados Ensayo de Flexión R-100 10%

Anexo 19. Resultados Ensayo de Flexión R-100 20%

Anexo 20. Resultados Ensayo de Flexión R-100 30%

TABLAS DE RESULTADOS ENSAYOS DE TRACCIÓN

Anexo 21. Resultados ensayo de tracción probetas normales

Anexo 22. Resultados Ensayo de Tracción R-30 10%

Anexo 23. Resultados Ensayo de Tracción R-30 20%

Anexo 24. Resultados Ensayo de Tracción R-30 30%

Anexo 25. Resultados Ensayo de Tracción R-50 10%

Anexo 26. Resultados Ensayo de Tracción R-50 20%

Anexo 27. Resultados Ensayo de Tracción R-50 30%

Anexo 28. Resultados Ensayo de Tracción R-100 10%

Anexo 29. Resultados Ensayo de Tracción R-100 20%

Anexo 30. Resultados Ensayo de Tracción R-100 30%

TABLAS ENSAYO DE POROSIDAD

Anexo 31. Valores de Porosidad de Mortero Normal

Anexo 32. Valores de Porosidad de Mortero R-30 10%

Anexo 33. Valores de Porosidad de Mortero R-30 20%

Anexo 34. Valores de Porosidad de Mortero R-30 30%

Anexo 35. Valores de Porosidad de Mortero R-50 10%

Anexo 36. Valores de Porosidad de Mortero R-50 20%

Anexo 37. Valores de Porosidad de Mortero R-50 30%

Anexo 38. Valores de Porosidad de Mortero R-100 10%

Anexo 39. Valores de Porosidad de Mortero R-100 20%

Anexo 40. Valores de Porosidad de Mortero R-100 30%

TABLAS DE ENSAYOS DE PERMEABILIDAD

Anexo 41. Valores de Permeabilidad de Mortero Normal

Anexo 42. Valores de Permeabilidad de Mortero R-30 10%

Anexo 43. Valores de Permeabilidad de Mortero R-30 20%

Anexo 44. Valores de Permeabilidad de Mortero R-30 30%

Anexo 45. Valores de Permeabilidad de Mortero R-50 10%

Anexo 46. Valores de Permeabilidad de Mortero R-50 20%

Anexo 47. Valores de Permeabilidad de Mortero R-50 30%

Anexo 48. Valores de Permeabilidad de Mortero R-100 10%

Anexo 49. Valores de Permeabilidad de Mortero R-100 20%

Anexo 50. Valores de Permeabilidad de Mortero R-100 30%

TABLA DE RESULTADOS PARA EL ENSAYO DE ABSORCIÓN CAPILAR

Anexo 51. Absorción de Agua para cada Tipo de Mortero

Anexo 52. Resultados de los Ensayos de Absorción

TABLA RESULTADOS DEL ENSAYO SOLIDEZ BAJO LA ACCIÓN DE SULFATOS

Anexo 53. Valores de Desgaste bajo la acción de Sulfatos

TABLA DE RESULTADOS PARA EL ENSAYO AL IÓN CLORURO

Anexo 54. Concentraciones de Cloruros para los Morteros

Anexo 55. Valores de Flujo Iónico y Coeficiente de Difusión

Anexo 56. Valores de Permeabilidad al Ion Cloruro

AGRADECIMIENTOS

Ricardo Alfredo Cruz Hernández, Ingeniero Civil y Doctor en Estructuras, Director de la investigación por su constante apoyo y su valiosa asesoría.

Custodio Vásquez Quintero, Ingeniero Metalúrgico y Codirector de la Investigación, por su apoyo y sus valiosas orientaciones.

Jairo Hernández Salazar, Técnico del Laboratorio de Materiales, por su asesoría, colaboración a lo largo de la investigación.

Miguel Antonio Agudelo, Técnico del Laboratorio de Resistencia de Materiales por su asesoría en la realización de las pruebas mecánicas.

Ambrosio Carrillo Carrillo, Técnico del Laboratorio de Corrosión, por su asesoría en las pruebas realizadas.

Daniel Garabito, Técnico de la planta de aceros de la escuela de metalúrgica, por su disposición y servicio en pro de nuestra investigación.

Mario, Técnico del laboratorio de permeabilidad y porosidad de la Escuela de Ingeniería de Petróleos, por su asesoría en la realización de las pruebas.

Johana Laitón, auxiliar laboratorio de análisis industriales, Escuela de Química, por su abnegada colaboración y espíritu compañerista a lo largo de todo el camino hacia la consecución de nuestras metas.

Lenys Díaz, licenciada en idiomas, quien nos colaboró con la redacción y revision del libro final de la tesis.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento demográfico y las migraciones campesinas a las ciudades han inducido a la proliferación de residuos sólidos, como resultado de todas las actividades de los seres humanos.

Se localizan dentro de este marco general las basuras, que aunque se han producido siempre en el transcurrir de la vida de los hombres y de los pueblos, no constituían un problema porque se disponía de éstas a medida que las iban produciendo. La mayor parte era de tipo orgánico, lo que facilitaba su utilización como alimento para animales o para fabricación de abonos orgánicos.

Por otra parte, la producción para artículos de consumo era de bajo volumen y larga duración, muchos de ellos biodegradables como los empaques. Era la época en que el hombre tenía una relación armónica con la naturaleza.

Este estilo de vida pasado estaba fundamentado en un incipiente desarrollo industrial, escasa concentración demográfica, grandes espacios libres en las casas y una insuficiente educación sanitaria. De allí que las costumbres se orientaran más a "guardar" que a "tirar" y "desechar".

La congestión de estos espacios urbanos se hizo cada vez mayor y aumentaron de manera significativa los envases y empaques usados de vidrio, metal, plástico y desperdicios orgánicos, que al no tener reutilización o aprovechamiento se convirtieron en esa carga social de las ciudades denominada basura.

Debido a que las basuras (vidrio) están inundando las ciudades, contaminando el medio ambiente, alterando el equilibrio ecológico y su reutilización no es la más adecuada, decidimos darle un nuevo uso, como agregado para la construcción.

En la presente investigación, se muestra un estudio acerca de la variación de las propiedades más importantes en morteros al adicionar partículas de vidrio como agregado fino en diferentes granulometrías, para establecer la aplicación más apropiada que se le puede dar en la construcción según el ambiente al que será sometido.

El estudio contiene una descripción del mortero, sus propiedades más significativas tanto en estado plástico como endurecido y, su importancia dentro de los materiales de construcción de acuerdo al papel que desempeña. Además, tratará los temas de los desechos de vidrio, su contaminación, su utilización y su aplicación en la ingeniería civil.

En la fase experimental se caracteriza los materiales utilizados; se realiza las adecuaciones necesarias para la utilización de los mismos y, se realizan las pruebas físico-mecánicas más importantes como son la Resistencia a la Compresión, a la Flexión y la Tracción, así como pruebas físico-químicas para conocer su comportamiento ante la corrosión, tales como solidez ante la acción de sulfatos, difusión al ión cloruro, permeabilidad, porosidad y absorción capilar.

1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

1.1 OBJETIVO GENERAL

Utilizar vidrio molido de botellas como agregado en morteros, para la obtención de un material que pueda ser empleado en la construcción.

1.1.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Adecuar químicamente el vidrio molido para que sea resistente a la reacción álcali agregado, con el fin de mezclarlo con mortero tradicional.
- Determinar las propiedades físico-mecánicas a compresión, flexión, Tracción Indirecta, Permeabilidad, Absorción Capilar y Porosidad del mortero con vidrio molido, para diferentes dosificaciones.
- Evaluar el comportamiento del material a la Difusión del ion Cloruro y la Solidez bajo la acción de Sulfatos.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

➤ Importancia del vidrio reciclado en la industria de la construcción:

La acumulación de residuos sólidos ha sido un problema en estos últimos años, debido al alto crecimiento poblacional, gran industrialización y poco reciclaje de materiales, generando una elevada contaminación al medio ambiente; por lo tanto, es necesario desarrollar nuevas técnicas para la reutilización de materiales reciclables, con la finalidad de preservar los recursos naturales y de mantener en equilibrio el medio ambiente.

En el entorno se generan grandes cantidades de residuos de vidrio y, por tratarse de productos no biodegradables, se presenta la necesidad de ser reciclados y darles una adecuada reutilización. Los restos de vidrio pueden ser resultado del uso industrial, comercial, hospitalario, de las propias fábricas de vidrio y del uso doméstico en su gran mayoría. El vidrio destinado al reciclaje se presenta en forma de desperdicios, utensilios como botellas, envases, etc., en colores y dimensiones variadas.

En cuanto a su destino, los restos de vidrio pueden ir a rellenos sanitarios, terrenos no controlados, ser reutilizados por algunas industrias para diferentes procesos que no cumplen con los requerimientos de salubridad básicos, acumulados en campo abierto generando una proliferación de insectos, produciendo contaminación y graves perjuicios al medio ambiente.

Es por ello que urge buscar nuevas formas de utilizar el vidrio como producto de reciclaje, adecuándolo a diferentes actividades de la industria de la construcción. Es en este campo, donde nuestro interés investigativo se centra para resaltar la importancia del vidrio reciclado como un nuevo agregado en la adecuación de las

mezclas de mortero y concreto, brindando soluciones a problemas como el de la expansibilidad que afectan la calidad de los mismos.

Adicionalmente, se busca conocer el comportamiento de este nuevo material ante el ataque de agentes químicos (ácidos y sales), sus propiedades mecánicas y otras características como su peso específico.

- Disponibilidad de residuos sólidos en el relleno “El Carrasco” provenientes de Bucaramanga y su Área Metropolitana.

Para la zona de influencia del proyecto se tienen los siguientes datos de existencia de residuos correspondientes al periodo comprendido entre 1º de enero al 31 de agosto de 2003.

Tabla1. Disponibilidad de residuos sólidos en Bucaramanga

TIPO DE RESIDUO	CANTIDAD (Ton)
ASEO DOMICILIARIO	49,275.267
CAUCHO Y LLANTAS**	51.360
VIDRIO TEMPLADO	10.810
RETAL DE ACERRÍOS	87.885
RETAL DE TORNO	10.075
TAMO DE ARROZ	26.470
VIDRIO BOTELLA*	480.00

* Este dato es aproximado debido a que en el relleno no se lleva registros precisos. Corresponden a la empresa de reciclaje “Nuevo Renacer” que es la encargada de comercializar con los recicladores que trabajan en el Carrasco.

En la ciudad funcionan diferentes empresas de reciclaje que se encargan de recolectarlo para enviarlo a otras ciudades del país donde son procesadas. (PELDAR-Medellín, Envigado).

El cuadro presenta un resumen de las recicladoras de vidrio de la ciudad de Bucaramanga y el número de personas dedicadas a este negocio.

Tabla 2. Datos recicladoras de la ciudad de Bucaramanga

EMPRESA DE RECICLAJE	CANTIDAD (Ton/mes)	PERSONAS QUE VIVEN DEL RECICLAJE
RECICLADORA NUEVO RENACER	60	185
RECICLADORA CHIMITÁ	15	60
RECICLADORA COOPRESER	10	55
DEPÓSITO LA 19	12	49
RECICLADORA MOTTA LTDA	14	31
ENVASES LA 22	17	65

Como podemos observar, el número de personas que viven de la industria del reciclaje es considerable y puede ser aún mayor, debido a que no se llevan estadísticas en este tema.

Es importante considerar los beneficios económicos y sociales que brindará el desarrollo de esta propuesta que generaría nuevos empleos y mejores condiciones de vida para el gran número de personas que viven y dependen del reciclaje.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 MORTEROS

Dentro del desarrollo de nuestra investigación es primordial el estudio a fondo de los morteros, ya que ésto nos permitirá conocer parámetros vinculados a la naturaleza de estas mezclas, y con el fin de descubrir las ventajas y desventajas que se lograrán al adicionar partículas de vidrio en diferentes porcentajes y granulometrías, teniendo como punto de referencia los morteros tradicionales.

2.1.1 DEFINICIÓN:

Es una mezcla plástica de cemento, arena, agua y aditivos que, dependiendo de la dosificación, ofrece la trabajabilidad y resistencia suficiente para ser utilizado básicamente en tres aspectos:

- Recubrimiento de muros y pisos
- Relleno de mampostería estructural
- Pega de unidades de mampostería.

2.1.2 PROPIEDADES DE LOS MORTEROS

2.1.2.1 Propiedades del mortero en estado plástico.

- **Retención de agua:** Mide la capacidad del mortero de mantener su plasticidad, al ponerse al contacto con una superficie absorbente.

Se espera que los morteros, con adiciones de vidrio, mantengan su plasticidad, debido a que las partículas de arena y vidrio poseen similar densidad.

- **Trabajabilidad:** Facilidad de colocación de la mezcla.

De acuerdo con la utilidad del mortero, algunos autores sugieren ciertos valores de fluidez, como se ve en la siguiente tabla.

Tabla 3. Aplicaciones de Morteros según su Fluidez

Consistencia	Fluid %	Condiciones de Colocación	Ejemplos de tipo de Estructura	Ejemplos del Sistema de Colocación
Dura (Seca)	80 a 100	Secciones sujetas a vibración	Reparaciones, recubrimiento de túneles, galerías, pantallas de cimentación, pisos.	Proyección neumática, con vibradores de formaleta.
Media (Plástica)	100 a 120	Sin vibración	Pega de mampostería, baldosines, pañetes y revestimientos.	Manual con palas y palustres.
Fluida (Húmeda)	120 a 150	Sin vibración	Pañetes, rellenos de mampostería estructural, morteros autonivelantes para pisos.	Manual, bombeo, inyección.

Para la fabricación de las probetas que se utilizarán en los diferentes ensayos, se escogió una consistencia media plástica de 110% que corresponde a un mortero para pega de unidades de mampostería o en proporciones 1:3.

- **Velocidad de endurecimiento:** Tasa de evaporación del agua de la mezcla en función del tiempo. Varía según:
 - Tipo de curado
 - Humedad de la mezcla
 - Diseño de la mezcla
 - Humedad del ambiente

Se espera que para el diseño del mortero con adiciones de vidrio, la velocidad de endurecimiento varíe según la granulometría y el porcentaje de vidrio que se utilice.

- **Retracción:** Cambios de volumen en la masa de mortero, debido a las reacciones químicas que ocurren en el momento de la dilatación, y que pueden ocasionar grietas y fisuras.

Causas:

- Superficies absorbentes
- Viento
- Elevadas temperaturas

- **Adherencia:** Capacidad del mortero para soportar cargas normales y tangenciales a las superficies de contacto.

El vidrio, por su naturaleza amorfa, presenta un buen comportamiento en lo concerniente a esta propiedad, y se espera que la adherencia de éste con la mezcla de estabilidad soporte cargas normales y tangenciales.

- **Resistencia:** Respuesta de las estructuras de mortero al ser solicitada por los diferentes requerimientos de carga, tales como:

- Compresión
- Flexión
- Tracción

Se espera que al disminuir la granulometría de las adiciones de vidrio, la resistencia del mortero varíe sustancialmente.

- **Durabilidad:** Capacidad a resistir agentes externos, sin afectar sus condiciones físico-químicas, como:

- Penetración del agua
- Desgaste por abrasión
- Temperatura
- Retracción al secado
- Agentes corrosivos

- Ambientes agresivos
- Ciclos de congelamiento y descongelamiento.

La durabilidad de un mortero está asociada con su vida de servicio, bajo ciertas condiciones ambientales dadas. Los diversos factores que pueden degradar un mortero son:

Tabla 4. Factores de Degradación del Concreto y Mortero.

Agentes Atmosféricos	Radiación: solar, nuclear y térmica Calor: elevadas o bajas temperaturas o ciclos térmicos Agua: sólida (hielo-nieve); líquida (lluvia y condensación); y vapor (humedad relativa) Aire: gases, nieblas, partículas sólidas Congelación y Deshielo. Viento.
Factores Biológicos	Microorganismos, fungicidas y bacterias.
Factores de Carga	Cargas sostenidas y periódicas, acción física del agua y del viento, acciones combinadas; Movimientos adicionales que causen solicitaciones mecánicas.
Factores incompatibles	Químicos y Físicos
Factores de Servicio	Diseño, instalaciones y procedimientos de mantenimiento, desgaste y vandalismo.

2.1.3 CLASIFICACIÓN DE LOS MORTEROS.

Los diferentes tipos de mortero se pueden clasificar de innumerables formas, entre ellas:

- **Tipo de composición:** este método se basa en la clasificación según el tipo de aglutinante o el material distintivo en la fabricación del mortero. Algunos son:
 - Morteros de cemento: es el tipo de mortero más usado, su principal característica es su alta resistencia y durabilidad.

- Morteros calcáreos: su componente aglutinante es la cal, se caracteriza por su manejabilidad; su uso es muy limitado en nuestro país.
- Mortero combinado: sus elementos aglutinantes son el cemento Pórtland y la cal hidratada. Esta mezcla se caracteriza por poseer una buena manejabilidad y una resistencia aceptable.
- Mortero celular: se caracteriza por la incorporación de aire, adición de espuma o cascarilla de arroz. Su principal propiedad es su bajo peso.
- Mortero polimérico: se caracteriza por poseer propiedades plásticas.

- **Tipo de preparación:**

- Mortero premezclado
- Mortero preparado in situ

- **Tipo de función que cumplen:**

- Mortero sin función estructural o morteros de recubrimiento; sirven para:
 - friso o pañete
 - retención de agua
 - pega de enchapes
- Mortero con función estructural
 - morteros para elementos estructurales
 - morteros de mampostería
 - morteros de pega

- **Tabla 5. Usos de los Morteros de Cemento**

Mortero	USOS
1:1	Mortero muy rico para impermeabilizaciones y rellenos
1:2	Para impermeabilizaciones y pañetes de tanque subterráneos. Rellenos

1:3	Impermeabilizaciones menores. Pisos
1:4	Pega para ladrillos en muros y baldosines. Pañetes finos
1:5	Pañetes exteriores: pega para ladrillos y baldosines, pañetes y mampostería en general. Pañetes no muy finos.
1:6 y 1:7	Pañetes interiores: pega para ladrillos y baldosines, pañetes y mampostería en general. Pañetes no muy finos.
1:8 y 1:9	Pegas para construcciones que se van a demoler muy pronto. Estabilización de taludes en cimentaciones.

2.2 TIPOS DE CORROSIÓN O AFECTACIÓN DE LA DURABILIDAD DE UN MORTERO.

2.2.1 Corrosión Externa

- **Corrosión física:** desprendimiento del material por desgaste mecánico al contacto con agentes externos que lamen y gastan sus capas superficiales, más conocido como erosión.
- **Corrosión química:** se presenta cuando una disolución agresiva ataca al material, intercambiando iones. Se puede presentar de dos formas:
 - Corrosión por cambio iónico: debida a la reacción de cambio entre cargas eléctricas de los componentes de la pasta endurecida de cemento y las sustancias presentes en el agua agresiva.
 - Corrosión por expansión: se presenta en la superficie de mortero una acción físico-química instantánea que produce desgaste e intercambio aniónico, lo cual inicia la destrucción del mortero. Esto produce en la estructura expansiones y dilataciones reiteradas que aflojan la composición de la matriz de mortero y producen su inminente desintegración.

- Corrosión por lixiviación: producidas por la acción de aguas poco carbonadas, aguas blanda y agua que contiene ácido carbónico. Se espera que el mortero adicionado con vidrio tenga un buen comportamiento ante la presencia de lixiviados.

2.2.2 Corrosión Interna

- Exceso de yeso en el cemento que se pone en contacto con una solución de cal.
- Adición excesiva de cenizas volantes al cemento.

Se espera que el nuevo material soporte bien el fenómeno de la corrosión interna, pues el vidrio es un compuesto bajo en materiales calcáreos.

2.2.3 Ataques al Mortero Por Parte del Medio Ambiente

- Ataque por sulfatos: interacción físico-química entre los minerales constituyentes de la pasta de mortero y los iones sulfatos presentes en el medio. Manifestaciones:
 - ataque en forma de expansión
 - pérdida de masa o desintegración
 - agrietamiento
- Carbonatación: inclusión de CO_2 atmosférico que reduce la alcalinidad de la pasta y produce la despasivación y como consecuencia la corrosión del acero en elementos estructurales.
- Ciclo de hielo y deshielo: consiste en la congelación y descongelación del agua absorbida por la mezcla de mortero que al pasar de un estado a otro, genera tensiones que agrietan internamente la estructura y generan la pérdida de resistencia y durabilidad. Se espera que, con las adiciones de vidrio, en granulometrías finas se reduzca la permeabilidad y porosidad; y por tanto, se mejoren las resistencias a los ciclos de hielo y deshielo.

- **Ataque por cloruros:** es el ataque que presenta las armaduras metálicas de hormigón, debido al paso del anión cloruro por la matriz de mortero, ya sea por mecanismos de difusión, succión capilar o evaporación. En la realización del proyecto se evaluará para las diferentes combinaciones de tamaños y porcentajes la resistencia a la difusión del anión cloruro. Esto mediante la estimación del coeficiente de difusión.

2.3 EL VIDRIO

2.3.1 DEFINICIÓN DEL VIDRIO

El vidrio es una disolución sólida de varios silicatos de sodio, calcio, plomo, etc. Obteniéndose por fusión a elevadas temperaturas, y una vez enfriada, la masa adquiere el estado amorfo, transparente, frágil y resistente.

Es una sustancia amorfa, es decir, no cristalizada, que por su estructura se parece a un líquido, pero cuya cohesión, a la temperatura ordinaria, es tan grande que aparenta un sólido. Los vidrios no tienen puntos de fusión y de solidificación precisos; por calentamiento, se ablandan y llegan al estado líquido pasando por un estado intermedio, el denominado estado pastoso.

2.3.2 RESEÑA HISTÓRICA DEL VIDRIO

Muchos autores de la antigüedad escribieron acerca del vidrio. Plinio el Viejo (23-79 d.C.), por ejemplo, narró en su Historia Natural que el descubrimiento de ese material tuvo lugar en Siria, cuando unos mercaderes de natrón, probablemente en ruta hacia Egipto, preparaban su comida al lado del Río Belus, en Fenicia. Al no encontrar piedras para colocar sus ollas, pusieron trozos del natrón que llevaban como carga, y a la mañana siguiente, vieron cómo las piedras se habían fundido y su reacción con la arena había producido un material brillante, vítreo, similar a una piedra artificial. Tal fue, en síntesis, el origen del vidrio.

Estrabón (58 a.C.-25 d.C.), por su parte, en su Geografía describe con admiración un sarcófago de vidrio, y asegura que en un punto localizado entre Tolemaida y Tiro se extraía la arena apropiada para el vidrio. El griego Heródoto (484-410 a.C.), considerado como el “Padre de la Historia”, relata la manera en que los etíopes embalsamaban a sus muertos para colocarlos en sarcófagos de vidrio. Eliano, escritor griego del siglo III, narra las condiciones en que Jerges, el hijo de Darío, descubrió el cuerpo de un jefe asirio en un ataúd de vidrio.

Salomón, en sus Proverbios, condenó al que miraba el vino a través de un vaso de vidrio, y también en el Antiguo Testamento se encuentra mencionado el vidrio en la Historia de Job: “No se compara el oro y el cristal, ni se cambia por vasija de oro fino. Corales y cristal no merecen ni mención; la sabiduría vale más que las perlas”.

Todas estas alusiones resultan muy posteriores a la época en que comenzó a fabricarse el vidrio, y en su mayoría pasaron de generación en generación por transmisión oral antes de ser perpetuadas por la escritura. De manera adjunta, dichos testimonios constituyen la versión de los vencedores, lo cual les otorga un cierto grado de duda en cuanto a su veracidad. Igualmente cuestionables, son las investigaciones históricas del siglo XIX sobre el mundo antiguo, ya que en ellas prevalece una visión romántica y poco científica acerca de los orígenes de la cultura occidental. Es por ello que cuando se da inicio a una investigación relacionada con las civilizaciones pretéritas, se suscita el problema de que las fuentes históricas varían mucho en la calidad de la información que ofrecen. Empero, en la actualidad existen datos más seguros, sustentados en los resultados que se obtienen por el empleo del radiocarbono, la dendrocronología, el arqueomagnetismo, la informática, la investigación documental y el trabajo de campo realizado por los arqueólogos.

Entre los textos antiguos antes mencionados, resalta por su importancia la Historia Natural de Plinio el Viejo, escrita en el primer siglo después de Cristo. En ella, se ofrecen buenas evidencias acerca de la región geográfica en la que pudo haber sido descubierto el vidrio y sobre la manera accidental en que tal episodio ocurrió. No obstante, los detalles del descubrimiento narrado por Plinio son poco confiables, ya

que para lograr el punto de fusión del natrón que dio por resultado la formación del vidrio, hubiera sido necesaria una temperatura aproximada a los $1'300^{\circ}$ o $1'500^{\circ}$ C., mientras que una fogata al aire libre puede alcanzar, cuando mucho, los 600° C.

Si en los aspectos físicos se pueden suscitar dudas, en lo que respecta a la información sobre los fenicios, existen verdades indiscutibles. Por un lado, ellos fueron los comerciantes por excelencia de la época, ya que al carecer de recursos naturales en sus tierras, buscaron en el comercio otra forma de supervivencia. Incluso, pedían permiso a los egipcios para comprar y vender libremente en sus costas, llevando después los productos de ese imperio a los puertos de todo el Mediterráneo. Los fenicios no sólo intercambiaban objetos en sus viajes, sino que también propagaban la ciencia, los conocimientos y costumbres de todo el mundo conocido. Muchos eran los productos que comercializaban, entre ellos el natrón. Este material era sumamente apreciado porque se empleaba tanto para el aseo de los dientes como para el baño. Además, al ser disuelto en agua funciona como desengrasante, por lo que se utilizaba para limpiar la loza. Los egipcios, por su parte, lo aprovechaban constantemente en el proceso de momificación. Es probable que además del natrón, los fenicios comercializaran objetos de faiensa y vidrio, los cuales eran fabricados en Egipto. Los artesanos de ese imperio eran famosos en todo el Mediterráneo por imitar casi a la perfección, con dichos materiales, las piedras preciosas y semipreciosas.

2.3.3 ESTRUCTURA DEL VIDRIO

Un gran número de sustancias químicas solidifican del estado fundido en forma de vidrio. La formación del vidrio depende de la velocidad de enfriamiento y requiere tipos diferentes de enlaces (enlace covalente y enlace iónico) entre los átomos o grupos de átomos. Como resultado, los productos que forman el vidrio tienen una fuerte tendencia en el estado fundido para enlazarse en tres dimensiones por polimerización de una manera desordenada. Los cristales se forman cuando los átomos individuales se ordenan en 3 dimensiones, lo que es conocido con el nombre de red cristalina, tan pronto como la sustancia particular cambie del estado

líquido al estado sólido. El vidrio forma, al enfriarse del estado líquido, una red espacial desordenada. Los principales componentes que participan en la formación del vidrio son llamados por ésto los formadores de la red. Iones pueden ser también incorporados en esta red de moléculas que forman el vidrio; éstos alteran la red en ciertos lugares y modifican su estructura y las propiedades del vidrio. Por este motivo, son llamados los modificadores de la red.

2.3.4 COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL VIDRIO

- Vitrificantes (arena, ácido bórico, bórax, ácido fosfórico, etc.)
- Fundentes (sosa, potasa, sulfato sódico, lepidolita, etc.)
- Estabilizantes (carbonatos de calcio, bario y magnesio, alúmina, óxido de plomo, dolomita, etc.)
- Accesorios, los cuales se dividen en: afinantes (nitrato sódico, óxido arsenioso, antimonio, etc.), decolorantes (bióxido de manganeso, óxido de níquel, etc.), opalinizantes (fluoruro cálcico, criolita, fluosilicato sódico, etc.) y colorantes (óxido de cobalto, rojo azulado; óxido ferroso, azul; óxido férrico, amarillo; óxido de cromo, verde grisáceo; trióxido de cromo, amarillo; óxido de cobre, verde azulado; óxido de uranio, verde amarillento fluorescente; selenio elemental, rosa; sulfuro de cadmio coloidal, amarillo; etc.)

Gráfica 1. Composición Química del vidrio



2.3.5 PROPIEDADES DEL VIDRIO

El vidrio se caracteriza por una resistencia química máxima, una dilatación térmica mínima y, en consecuencia, una elevada resistencia al choque térmico. Este comportamiento físico y químico óptimo del vidrio hace que sea el material ideal para el uso en el laboratorio, en las grandes plantas industriales, en la industria de la construcción. Por otra parte, es muy adecuado para aplicaciones industriales en todas las áreas de aplicación, en las cuales se requiere una extrema resistencia al calor, resistencia al choque térmico, estabilidad mecánica, así como resistencia química excepcional.

- **RESISTENCIA FÍSICA**

Dependiendo de la composición, algunos vidrios funden a temperaturas muy bajas, como 500 °C, mientras que otros necesitan 1.650 °C. Presentan normalmente una resistencia a la tracción entre 3.000 y 5.500 N/cm², aunque puede llegar a sobrepasar los 70.000 N/cm² si el vidrio ha sido especialmente tratado. La densidad relativa oscila entre 2 y 8, que equivale a decir que oscila entre una densidad menor que la del aluminio y una mayor que la del acero. Variaciones de igual amplitud se dan en las propiedades eléctricas y ópticas.

- **RESISTENCIA QUÍMICA**

La resistencia química del vidrio es más amplia que la de otros materiales conocidos. El vidrio es resistente al agua, a ácidos, soluciones de sales, sustancias orgánicas y también frente a halógenos como cloro y bromo. Tiene, también, una relativamente buena resistencia frente a soluciones alcalinas. Solamente el ácido fluorhídrico, el ácido fosfórico concentrado y soluciones fuertemente alcalinas atacan la superficie del vidrio a temperaturas elevadas.

2.3.6 PROCESO DE FABRICACIÓN DEL VIDRIO

Para la fabricación del vidrio se utiliza arena, sosa y caliza. Estos componentes son molidos y mezclados para, posteriormente, calcinarlos eliminando el agua y el anhídrido carbónico. Después, pasan al crisol de tierra refractaria donde se funden a temperaturas superiores de 1.500 grados. La arena se encuentra en un 70% y es denominada vitrificante; la sosa, en un 18% ayuda a fundir, recibiendo el nombre de fundente; la caliza, en un 10%, actúa como estabilizante. El 2% restante lo componen otras sustancias como pueden ser plomo, boro, óxidos metálicos, que modifican las propiedades del vidrio así como su aspecto.

El proceso parte de ciertas mezclas líquidas que tienen la propiedad de que, al enfriarse lentamente su viscosidad, aumenta con gran rapidez hasta alcanzar un punto en el que se produce la solidificación (estado vítreo) sin que se presente la cristalización. Son muchos los compuestos de naturaleza tanto inorgánica como orgánica, que pueden solidificarse en estado vítreo, como las resinas, silicatos, ácido bórico, ácido metafosfórico, selenio, azúcares, etc.

Entre todas las sustancias en estado vítreo, se da por antonomasia el nombre de vidrio, y son conocidos como tal vulgarmente, por sus múltiples aplicaciones, los derivados de los silicatos. El vidrio no es una combinación química, sino que se compone de varios óxidos. Con ayuda de los rayos X se ha podido comprobar que su orden molecular es irregular, análogo al de un líquido, y que existe un retículo de tetraedros de SiO_4 (con el Si en el centro y un O en cada vértice) unidos por puentes de oxígeno. Los óxidos formadores de retículo (óxidos aniónicos) son el silícico, SiO_2 , el bórico B_2O_3 , y el aluminico, Al_2O_3 . La sílice puede constituir por sí sola un vidrio, el vidrio de cuarzo, pero para su fabricación se precisa una temperatura muy elevada, superior a 1600 °C. Un contenido de óxidos alcalinos (de sodio, potasio y litio) rebaja el punto de fusión, pero entonces los vidrios tienen el inconveniente de

ser solubles en agua. Los óxidos alcalinotérreos (calcio, magnesio y bario) presentes en los vidrios los hacen solubles.

2.3.7 USOS Y CLASIFICACIÓN DEL VIDRIO

El hombre lo utiliza desde la Edad del Hierro y siempre ha estado unido a la evolución de la humanidad. Fue muy apreciado en Roma y más tarde, en Bizancio. Su primera expansión industrial fue durante la Edad Media en Venecia y en el siglo XIX sufre un gran impulso, ya que es cuando comienza a ser una realidad la industria alimentaria. Los productores comprobaron que los alimentos envasados en este material se conservaban mejor.

En el mundo actual se le dan diversos usos al vidrio tales como:

- aislante eléctrico y térmico
- decoración
- empaque
- aparatos ópticos

- **Clasificación del vidrio**

Los vidrios se clasifican, además de su composición química, por su modo de fabricación y uso a que son destino, así: vidrios de ventanas, lunas laminadas, vidrios de botella, vidrios para ópticas y aparatos químicos, etc.

Según su composición química son:

- **Vidrio soluble y vidrio sodocálcico**

El vidrio con gran contenido sódico, que puede disolverse en agua convirtiéndose en un fluido espeso, es conocido como vidrio soluble y se emplea como material ignífugo y cemento de sellado. La mayor parte del vidrio que se produce lleva como

álcalis sosa y cal y se utiliza para hacer botellas, vajillas, bombillas, focos, ventanas y lunas.

- **Vidrio al plomo**

El vidrio fino que se utiliza para vajillas y se conoce como cristal es el resultado de fórmulas que combinan sílice y potasio con óxido de plomo. El vidrio al plomo es pesado y presenta un elevado índice de refracción a la luz, lo que le convierte en un material apropiado para la fabricación de lentes y prismas, así como para joyas de imitación. Dado que el plomo absorbe las radiaciones de alta energía en las instalaciones nucleares, se utilizan vidrios al plomo para la protección de los trabajadores.

- **Vidrio de borosilicato**

Vidrio cuya composición presenta una predominancia de bórax, además de sílice y álcali. De larga durabilidad y muy resistente a los elementos químicos y al fuego; se usa como material de cocina, laboratorio y como equipo para procesos químicos.

Según sus sistemas de fabricación son:

- **SISTEMA PITTSBURG:** En este sistema de fabricación la distribuidora se encuentra sumergida unos 7 cm bajo la superficie de la masa de vidrio, y su misión, entre otras funciones, es facilitar la salida de dicha masa vítrea homogeneizada. El ancho de la línea de vidrio es mantenido mediante unos rodillos estriados que actúan sobre los bordes de ella.
- **SISTEMA LIBBEY - OWENS:** En este sistema desaparece la distribuidora y es mantenido el ancho de la línea de forma análoga al Pittsburgh. De este modo, el vidrio se eleva verticalmente hasta una altura de 60 cm sobre un

rodillo para continuar su marcha en sentido horizontal a lo largo del " arca de recocido".

2.3.8 EL PROBLEMA DE LOS RESIDUOS DE VIDRIO

Los residuos de materiales sólidos no reciclados, como el vidrio, afectan el medio ambiente, ocasionando problemas de salubridad, incendios y accidentes; por ello, se hace necesario desarrollar nuevas técnicas de reutilización de dicho material con la finalidad de preservar los recursos naturales, mantener un equilibrio ambiental y generar desarrollo económico.

Infortunadamente, en el medio sólo se recicla en pequeñas cantidades el vidrio transparente de botellas, dejando de lado el vidrio de botellas de color, cristalería, vidrio templado y en general, todo aquel vidrio que se utiliza en diversos productos que no puede ser reciclado. Y es precisamente este material el que puede ser utilizado como agregado en mezclas de mortero, resolviendo así el problema de la contaminación por residuos no biodegradables y el aporte como material constructivo especialmente en zonas donde el agregado fino es escaso y costoso.

2.3.9 REUTILIZACIÓN DE VIDRIO RECICLADO

Desde hace décadas han estado en desarrollo soluciones innovadoras para resolver el problema de disposición de vidrio usado. Nuevos métodos para el reciclaje, reutilización o reducción de envases podrían ayudar a aliviar el problema de los depósitos de vidrio.

En Bucaramanga, un pequeño porcentaje del vidrio de desecho es reciclado y enviado a Antioquia para su proceso de reutilización, pero el mayor porcentaje va a

parar a los rellenos sanitarios, a los basureros ilegales y, por lo general, a cualquier espacio público de la ciudad, generando contaminación y problemas de salubridad.

2.3.9.1 APLICACIÓN DE RESIDUOS DE VIDRIO EN INGENIERÍA CIVIL

El uso del vidrio en la actualidad en las construcciones civiles se limita a aspectos netamente estéticos, tales como fachadas, ventanas, claraboyas, cielos rasos, etc. Se conoce también, por su utilización para la fabricación de baldosas, como material de adorno y en la fabricación de adoquines.

En los Estados Unidos la universidad de Columbia en New York, se han realizado investigaciones para adecuarlo como material de agregado en la fabricación de mezclas de hormigón obteniendo resultados satisfactorios.

3 ETAPA EXPERIMENTAL

3.1 DISEÑO DE LA MEZCLA DE MORTERO

3.1.1 Caracterización de los materiales empleados

Todos los materiales y los procedimientos empleados deben ser controlados por las normas vigentes del país, (NTC) y algunas de interés internacional (ASTM), las principales normas a utilizar en la caracterización de los materiales están incluidas a continuación.

- **Cemento**

El cemento utilizado es un cemento hidráulico encargado de brindar la mayor parte de la resistencia al mortero, inicialmente, siendo igualmente el primer agente conglomerante del conjunto.

El cemento utilizado es producido por “Cementos Paz del Río”, referenciado como Pórtland Tipo I, en su presentación de 50 Kg., con los siguientes datos:

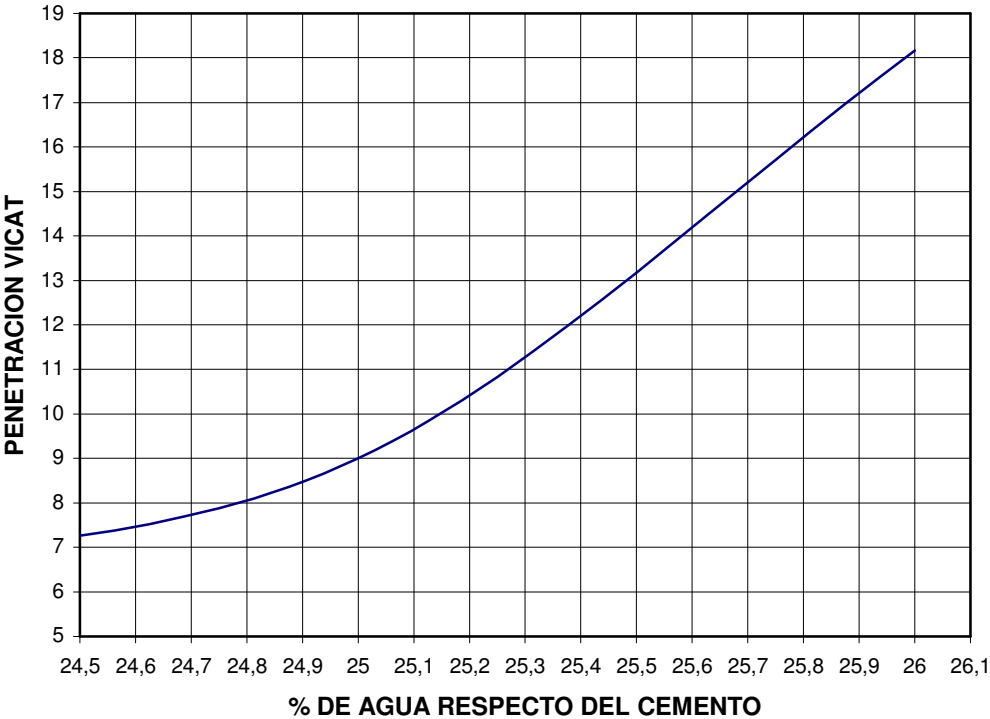
Peso Específico (NTC 221)	2.93 gr/cm ³
Tiempo de fraguado (NTC 118)	0.58 Horas
Consistencia normal del Cemento (NTC 110)	25.15 %

El ensayo de consistencia del cemento es de particular interés para el desarrollo del diseño de las mezclas que se van a someter al ensayo de tracción del mortero, puesto que la relación agua / cemento que se va a emplear depende de este valor. La gráfica de consistencia del cemento depende de la penetración de Vicat para diferentes porcentajes de agua respecto del peso del cemento. Los datos obtenidos son los siguientes.

Tabla 6. Datos para la Gráfica de Consistencia del Cemento

CEMENTO	AGUA		PENETRACIÓN	
gramos	%	ml	Parcial	Promedio
500	26	130	18	18.17
500	26	130	18.5	
500	26	130	18	
500	25	125	9.5	9
500	25	125	8.5	
500	25	125	9	
500	24	120	6.5	6.33
500	24	120	6.5	
500	24	120	6	

Grafica 2. Gráfico de Consistencia del Cemento



- **Agua**

Se pueden distinguir tres usos principales del agua: una es el agua de amasado, encargada de lubricar los agregados causando fluidez de la masa; el agua de hidratación, encargada de reaccionar químicamente con las partículas de cemento generando un producto estable; el agua de curado, encargada de controlar la temperatura y los cambios de humedad del mortero a fin de lograr la mayor hidratación del cemento.

- **Recomendaciones para la escogencia del agua**

El agua de amasado de los morteros y hormigones no debe contener sustancias en suspensión o disueltas que alteran el fraguado del cemento.

Las aguas muy puras, como las de lluvias, son ácidas, tienen un PH menor de 7 (1), y las estancadas contienen materias orgánicas. La temperatura del agua tiene importancia cuando es superior a los 30 ° C, por acelerar el fraguado de los morteros hidráulicos.

La cantidad de agua varía con la clase de aglomerantes, al evaporarse, deja poros, debilitando su resistencia e impermeabilidad.

El agua utilizada en esta investigación fue tomada del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, directamente de las redes de agua potable para consumo humano; por lo tanto, no fue necesario hacer análisis químicos, dada su reconocida calidad. Esta misma agua es la empleada por las obras de la ciudad en la preparación de sus morteros y concretos.

- **Arena**

Es el producto de la desintegración de las rocas por procesos mecánicos, debido a fenómenos naturales y artificiales; se acumulan en lugares llamados arenales y playas. Están formadas por un conjunto incoherente de granos de diversa forma, composición química y tamaño comprendidos entre los 0.074 mm y los 4.76 mm.

Fotografía 1. Arena empleada en los ensayo



- **Clasificación:**

Se clasifican por su composición y procedencia.

a) **COMPOSICIÓN MINEROLÓGICA:**

Pueden ser silíceas o cuarzosas, calizas, graníticas, arcillosas, delfespáticas, porfídicas, según sea el mineral que predomina: sílice, el carbonato de calcio, etc. Las mejores son las silíceas, por su dureza y estabilidad química. Las calizas se utilizan si son duras, rechazándose las blandas. Las graníticas, generalmente son poco homogéneas e inalterables, pudiéndose utilizar si son bastantes cuarzosas. Las arcillosas sólo pueden emplearse si la cantidad de arcilla es inferior al 3%, por retrasar el fraguado y alterar la plasticidad.

La naturaleza geológica de las arenas influye poco en la resistencia de los morteros, siempre y cuando sean duras, no reaccionen desfavorablemente con el aglomerante, y la forma las afecte de una manera considerable.

b) COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA:

Es la proporción en que se encuentran los granos de distintos tamaños, expresado en tanto por ciento. Se ha comprobado que tiene una gran influencia sobre la calidad y resistencia mecánicas. Mezclando arenas de granos con diversos tamaños, se obtiene una arena con el mínimo de huecos. Se necesitará menos cantidad de aglomerantes, y el mortero será más barato y compacto.

La densidad aparente de una arena varía poco con su calidad; oscila de 1.2 a 1.7 y promedio 1.4. El peso específico o densidad real varía entre 2.5 y 2.7.

Para los morteros y revocos que no precisen grandes resistencias, la presencia de arcilla en pequeña proporción es favorable, por hacer las pastas más plásticas y manejables.

La procedencia de la arena utilizada en esta investigación es Pescadero; este punto de extracción se encuentra a 1.6 Km. del Puente Pescadero sobre el Cañón del Río Chicamocha en la inspección de Policía Pescadero en el Municipio de Piedecuesta. En esta zona el Río produce varios meandros y depósitos de sedimentos, facilitando la extracción del material.

Para efectuar la caracterización de la arena, se realizaron los ensayos de análisis granulométrico, contenido de materia orgánica, gravedades específicas, peso unitario, % de absorción y % de vacíos.

En la foto 2 se pueden observar los tamices utilizados en el proyecto para realizar el análisis granulométrico a la arena empleada en el proyecto.

Fotografía 2. Serie de Tamices utilizados en el proyecto

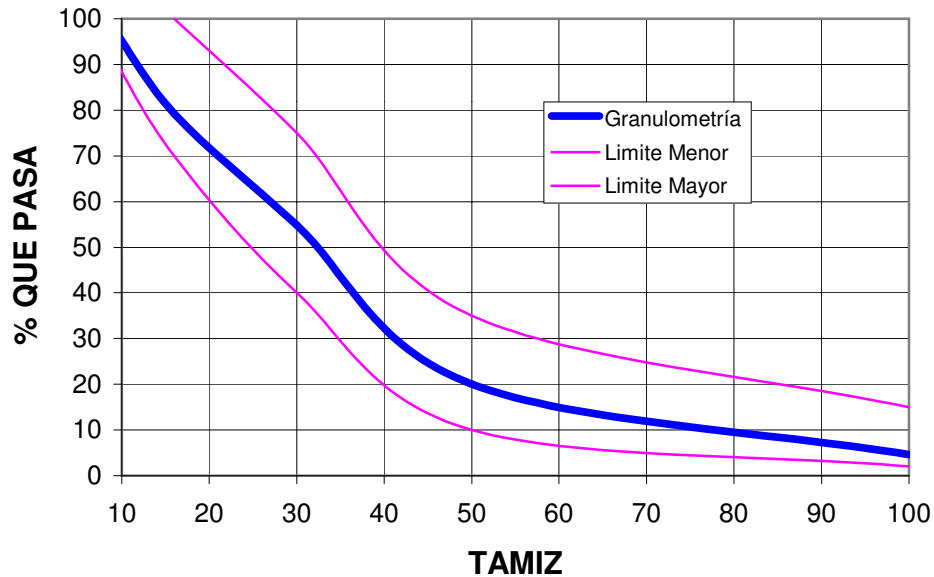


- **Análisis Granulométrico**

Tabla 7. Granulometría de la Arena

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO					
TAMIZ	TAMAÑO	PESO RETENIDO	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
4	4,76	0	0	0	100
8	2,38	0	0	0	100
16	1,19	207,8	20,78	20,78	79,22
30	0,595	243,5	24,35	45,13	54,87
50	0,297	348,6	34,86	79,99	20,01
100	0,149	154,2	15,42	95,41	4,59
FONDO		43,3			
TOTAL		997,4		PESO MUESTRA	1000 gr
MODULO DE FINURA		2,4131			

Gráfica 3. Granulometría Arena utilizada



- **Ensayo de contenido de materia orgánica**

Se empleó el método para determinar el contenido aproximado de materia orgánica en arenas usadas en la preparación de morteros y hormigones, descrito en la NTC 127.

Después de colocar una cantidad de arena (aproximadamente 130 cm³) en un frasco y añadir solución de hidróxido de sodio, se tapó el frasco, se agitó vigorosamente y se dejó reposar por 24 horas. Después de este período, se comparó el color de la solución normal de referencia (hidróxido de sodio) con la del líquido contenido en el frasco con arena. El color obtenido fue el mismo de la muestra de referencia, lo que indica:

Contenido de Materia Orgánica = 0%

Fotografías 3 y 4. Prueba de materia orgánica, inicial (izquierda) y final (derecha).



- **Ensayo de Gravedades Específicas, Peso Unitario, Absorción y Vacíos**

Se utilizaron las Normas NTC 92 (Método para determinar la masa unitaria de los agregados) y NTC 237 (Método para determinar el peso específico y la absorción de los agregados finos).

Fotografía 5. Ensayo de gravedad específica.



Tabla 8. Ensayo de Gravedades Específicas

GRAVEDADES ESPECIFICAS						
Datos						
A	=	Peso del Frasco + Agua hasta la marca, en el aire		674,4	Gramos	
B	=	Peso de la Muestra en condición S.S.S en el aire		500	Gramos	
C	=	Peso de la Muestra, Frasco y Agua agregada hasta la marca, en el aire		946,6	Gramos	
D	=	Peso de la Muestra secada al horno		492,28	Gramos	
CALCULOS						
Gravedad especifica real		$\frac{D}{(A - C + D)}$	=	$\frac{492,28}{674,4 - 946,6 + 492,28}$	=	2,236
Gravedad especifica aparente		$\frac{D}{(A + B - C)}$	=	$\frac{492,28}{674,4 + 500 - 946,6}$	=	2,612
Gravedad especifica aparente		$\frac{B}{(A + B - C)}$	=	$\frac{500}{674,4 + 500 - 946,6}$	=	2,190
PESO UNITARIO						
CALIBRACION DEL MEDIDOR						
P1	=	Peso del Medidor + vidrio		3054	Gramos	
P2	=	Peso del Medidor + vidrio + agua		5875	Gramos	
V	=	ien del medidor	$\frac{(P2 - P1)}{1000}$	=	$\frac{5875 - 3054}{1000}$	= 2,821 dcm3
DATOS						
Pm	=	Peso del medidor vacio		2558		
Pc	=	Peso del medidor + material S.S.S compactado		7237,3		
Ps	=	Peso del medidor + material S.S.S suelto.....		6712		
Peso unit. agreg.S.S.S compactado		$\frac{(Pc - Pm)}{V}$	=	$\frac{7237,3 - 2558}{2,821}$	=	1658,7 Kg/m3
Peso unit. agreg.S.S.S suelto		$\frac{(Ps - Pm)}{V}$	=	$\frac{6712 - 2558}{2,821}$	=	1472,5 Kg/m3
% de absorción		$\frac{(B - D) * 100}{D}$	=	$\frac{(500 - 494,1) * 100}{494,1}$	=	1,6 %
% de Vacios		$\frac{(E * 1000 - F)}{E * 10}$	=	$\frac{(2,63 * 1000) - 1658,7}{2,63 * 10}$	=	24,26 %

- **Vidrio**

Para poder utilizar el vidrio de botellas fue necesario someterlas a un proceso de reducción de tamaño. Inicialmente, las botellas fueron partidas en un molino de quijadas, para poderlas llevar luego a un molino de bandas (ver fotografías 6-8).

En este molino se alcanzan tamaños de partículas que oscilan entre 3 cm. y 0.5 mm. Seguidamente, se lleva este material al molino de cuchillas (ver fotografías 9 y 10) para obtener el tamaño requerido para la preparación de las mezclas de mortero.

Fotografía 6. Molino de quijadas



Fotografías 7 y 8. Molino de bandas



Fotografías 9 y 10. Molino de discos



Después del proceso de molido, se tamiza el material para así clasificar las diferentes granulometrías y fabricar las diferentes probetas que serán sometidas a los diversos ensayos.

Fotografía 11. Tamizadora



3.2 DISEÑO DE MEZCLA

La dosificación utilizada en la presente investigación es 1:3 en peso, con un contenido de agua según la relación Agua / Cemento de 0.65 para alcanzar una fluidez correspondiente al estado plástico (100-120%).

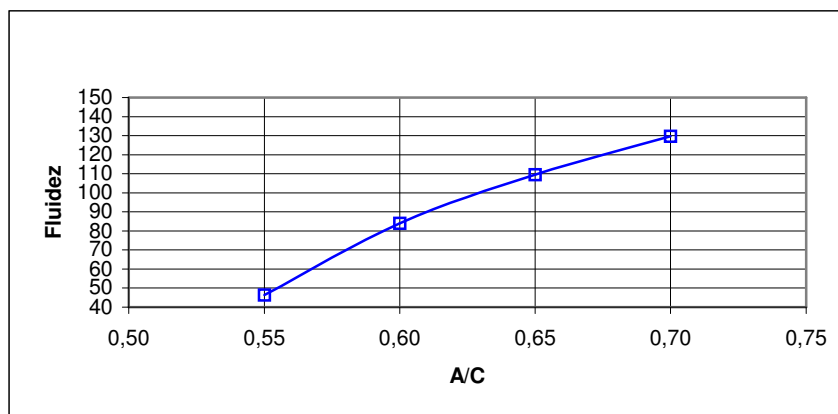
Tabla 9. Relación entre % de Fluidez y Relación a/c

Relacion A/C	Rayas	Diametro	Fluidez (%)
0,55	10,82	148,74	46,40
0,60	20,23	186,98	84,04
0,65	26,61	212,91	109,56
0,70	31,65	233,40	129,72

Fotografía 12. Mesa de Flujo



Gráfica 4. Relación entre % de Fluidez y Relación A/C



Las proporciones del mortero en peso son:

$$0.65 : 1 : 3 \text{ (A : C : F)}$$

Cálculo del contenido de cemento a partir de la siguiente expresión:

$$C = 1000 / ((1/G_c) + (n/G_A) + A/C)$$

Donde:

G_c = Peso específico del cemento (2.9 gramos/cm³)

G_A = Densidad Aparente seca de la arena (2.612 gramos/cm³)

n = Proporción arena cemento (3)

A/C = Relación Agua / Cemento (0.65)

Reemplazando se obtiene:

$$C = 1000 / ((1/2.9) + (3/2.612) + 0.65) = 466.55 \text{ Kg.}$$

$$\text{Arena} = 3 * 466.55 = 1399.65 \text{ Kg.}$$

$$\text{Agua} = 0.65 * 465.40 = 303.26 \text{ Kg.}$$

De modo que al tabular estos datos se tienen los datos de la tabla 10.

Tabla 10. Contenido de Materiales por Metro Cúbico

Material	Peso Seco kg.	Peso Específico	Volumen lts
Cemento	466,55	2,9	160,88
Arena	1399,65	2,6	535,87
Agua	303,26	1	303,26
	2169,46		1000,007

Para la obtención de las proporciones de la mezcla de materiales con vidrio molido se reemplazará parte del agregado fino por vidrio, cuyo peso específico es 2.19 gramos / cm³. Las proporciones a reemplazar son: 10, 20, 30 % del volumen total de la mezcla por partículas de vidrio retenidas en los tamices 30, 50, 100.

En las tablas (11,12 y 13) se pueden observar las proporciones de las mezclas.

Tabla 11. Proporciones para Mezclas de Mortero con 10% de Vidrio

Material	Peso Seco kg.	Peso Específico	Volumen lts
Cemento	466,55	2,9	160,88
Arena	1138,49	2,612	435,87
Agua	303,26	1	303,26
Vidrio	219	2,19	100
	2127,30		1000

Tabla 12. Proporciones para Mezclas de Mortero con 20% de Vidrio

Material	Peso Seco kg.	Peso Específico	Volumen lts
Cemento	466,87	2,9	160,99
Arena	877,29	2,6	335,87
Agua	303,47	1	303,47
Vidrio	438	2,19	200
	2085,63		1000

Tabla 13. Proporciones para Mezclas de Mortero con 30% de Vidrio

Material	Peso Seco kg.	Peso Específico	Volumen lts
Cemento	466,87	2,9	160,99
Arena	616,09	2,6	235,87
Agua	303,47	1	303,47
Vidrio	657	2,19	300
	2043,43		1000

De acuerdo con las Tablas 10, 11, 12 y 13 se puede observar que el peso por metro cúbico para los morteros con adiciones de vidrio disminuye, obteniéndose morteros más livianos.

Para distinguir los diferentes tipos de mezclas de morteros con adiciones de vidrio se eligió la siguiente terminología.

Tabla 14. Nomenclatura de las Mezclas de Mortero

TAMIZ RETENIDO	PORCENTAJE DE VIDRIO	NOMENCLATURA
0	0	NORMAL
30	10	R-30 10%
	20	R-30 20%
	30	R-30 30%
50	10	R-50 10%
	20	R-50 20%
	30	R-50 30%
100	10	R-100 10%
	20	R-100 20%
	30	R-100 30%

3.3 PRUEBAS DE LABORATORIO

El desarrollo de la fase experimental de esta investigación comprende diversos ensayos (Tabla 15) que nos permiten la caracterización del mortero adicionado con vidrio frente a su comportamiento físico mecánico, y físico químico.

Tabla 15. Ensayos Realizados durante la Investigación

PRUEBAS DE LABORATORIO
Método químico para determinar la reactividad potencial de los agregados
Compresión
Flexión
Tracción
Porosidad
Permeabilidad
Absorción capilar
Solidez ante la acción de sulfatos
Difusión y permeabilidad al ión cloruro

3.3.1 Método químico para determinar la reactividad potencial de los agregados.

- **Objeto**

Esta norma tiene por objeto establecer el método químico para determinar la reactividad potencial de un agregado con los álcalis del Pórtland.

- **Ensayos**

Las indicaciones para esta determinación se obtienen de la magnitud de la reacción durante 24 horas, y a 80°C de una solución 1 N hidróxido de sodio con agregado triturado y cribado de tal manera, que pase por el tamiz ICONTEC 297M y se retenga en el tamiz ICONTEC 149M.

- ❖ **Aparatos**

BALANZAS: Las balanzas y masas usadas para pesar los materiales, deben cumplir con los requisitos establecidos en la norma ICONTEC 220.

BALANZAS DE PRECISIÓN: La balanza analítica y las masas empleadas para determinar la sílice disuelta, por el método gravimétrico, deben cumplir con los requisitos establecidos en la ICONTEC 184.

EQUIPO PARA TRITURACIÓN Y MOLIENDA: Se deben usar una quebradora pequeña de quijada y un pulverizador de disco u otro equipo adecuado capaz de triturar y moler aproximadamente 4 Kg. de agregado de tal manera que pueda pasar por el tamiz ICONTEC 297M.

TAMICES: Se deben usar los trámites ICONTEC 297 y 149M.

BAÑO A TEMPERATURA CONSTANTE: Debe mantener una temperatura de $80 \pm 1^{\circ}\text{C}$.

APARATOS DE VIDRIO: Todo los recipientes y aparatos de vidrio se deben seleccionar cuidadosamente para que cumplan los requisitos particulares de cada una de las operaciones. Los matraces aforados, buretas y pipetas deben estar graduados con precisión.

RECIPIENTES PARA LAS REACCIONES: Se deben usar recipientes para las reacciones de 50 a 75 milímetros de capacidad fabricados con acero inoxidable u otro material resistente a la corrosión.

❖ Reactivos

PUREZA DE LOS REACTIVOS: Deben ser de una pureza suficiente para que puedan usarse sin que disminuyan la precisión en la determinación.

PUREZA DEL AGUA: A no ser que se indique otra cosa, cuando se menciona la palabra agua, debe entenderse agua destilada o equivalente.

ÁCIDO CLORHÍDRICO CONCENTRADO (DENSIDAD 1.19 g/cm^3). Debe guardarse en un frasco de vidrio químicamente resistente o en un recipiente adecuado de plástico.

ÁCIDO CLORHÍDRICO, VALORADO 0.05 N: Se prepara una solución, aproximadamente 0.05 N de HCl, y se valora de una precisión de ± 0.0001 . Cada día que se vaya a usar se debe valorar con una solución patronada de NaOH aproximadamente 0.05 N. La solución debe guardarse en un recipiente de vidrio químicamente resistente o en un recipiente adecuado de plástico.

ÁCIDO CLORHÍDRICO (1:1): Se mezcla volúmenes iguales de HCl concentrados de agua; se guarda la solución en un frasco de vidrio químicamente resistente o en un recipiente adecuado de plástico.

ÁCIDO FLUORHÍDRICO (HF): Se debe guardar la solución en un recipiente revestido interiormente con papel parafinado o encerado o con plomo o en un recipiente adecuado de plástico.

SOLUCIÓN INDICADORA DE FENOLFTALEÍNA: Se disuelve 1g de fenolfataleína en 100 ml de etanol (1:1). Se guarda la solución en un frasco de vidrio químicamente resistente o en un recipiente adecuado de plástico.

ÁCIDO SULFÚRICO CONCENTRADO (Densidad 1.84 g/cm^3): Se guarda la solución en un frasco de vidrio químicamente resistente o en un recipiente adecuado de plástico.

El contenido de sílice de los reactivos no es importante, y por tanto, no es necesario determinarlo.

❖ Preparación de la muestra para ensayo

El ensayo se puede realizar tanto en agregados finos como en agregados gruesos. Cuando los agregados finos y gruesos sean de un mismo material, puede efectuarse para todo el agregado.

La muestra de ensayo se debe preparar de una porción representativa del agregado por medio de trituración, de tal manera que pase por el tamiz ICONTEC 297 μ .

- Se reduce el agregado grueso a un tamaño máximo de aproximadamente 0,6 cm. Por medio de una trituradora pequeña de quijada.

Fotografía 13. Molino de Disco



- Se criban el agregado grueso triturado y la arena para recobrar las partículas comprendidas entre los tamices ICONTEC 297 μ y 149 μ .
- Se desecha el material que pase este último.
- Se reduce el material retenido en el tamiz ICONTEC 297 μ , haciéndolo pasar repetidamente a través de un pulverizador de tipo de disco, y acribándolo después de cada pasada. La separación de las placas debe ser aproximadamente de 0,3 cm. para la primera pasada y debe disminuir progresivamente todo lo posible para reducir hasta el máximo la proporción de finos que pasan el tamiz 149 μ .

- Se recomienda que cada fracción de agregado grueso se procese separadamente, y que el material comprendido entre los tamices ICONTEC 297 μ y 149 μ , que se obtiene de cada fracción, se combine en las proporciones en que vayan a usarse esas fracciones de hormigón.
- Se recomienda que, hasta donde sea posible, el vidrio sea cribado y las fracciones en que vayan a usarse en el concreto.

Fotografía 14. Muestra de vidrio molido



- Para asegurar que todo el material que pase por el tamiz ICONTEC 149 μ , ha sido removido, debe lavarse sobre este tamiz. No se debe lavar más de 100g al mismo tiempo.
- Se debe secar la muestra lavada a una temperatura comprendida entre 100 y 105°C durante 20 ± 4 horas. Se deja enfriar la muestra y se criba nuevamente en el tamiz ICONTEC 149 μ . Si al inspeccionar la muestra se encuentran películas limosas o arcillas que recubren las partículas, se repite el procedimiento de lavado y secado y se criba en el tamiz ICONTEC 149 μ ,

como se ha señalado anteriormente. La porción retenida en el tamiz ICONTEC149 μ se reserva para que sirva como muestra de ensayo.

- Se miden tres porciones de $25,00 \pm 0,05\text{g}$ representativas de la muestra de ensayo seca comprendida entre los tamices ICONTEC 297 μ y 149 μ .
- Se coloca una porción en cada uno de tres recipientes para reactivos se añaden con una pipeta o bureta, 25 ml de la solución 1,000 N de NaOH. A un cuarto recipiente para reactivos, se añade con una pipeta o una bureta 25 ml de la misma solución de NaOH para que sirva como testigo.

Fotografía 15. Muestras de vidrio para prueba de reactividad alcalina



- Se sellan los cuatro recipientes y se agitan suavemente para sacar el aire.
- Inmediatamente después de haber sellado los recipientes, se colocan en un baño líquido que se conserve entre $80 \pm 1,0^{\circ}\text{C}$. Después de $24 \pm \frac{1}{4}$ horas,

se retiran los recipientes del baño y se dejan enfriar bajo agua corriente durante 15 ± 2 minutos, hasta que la temperatura sea menor de 30°C .

Fotografía 16. Introducción de las muestras al horno



- Inmediatamente después de que se hayan enfriado los recipientes, se abren y se filtra la solución para separar el agregado residual. Esto mediante un embudo, al cual se le coloca papel de filtro de bajo residuo de ceniza.
- Cuando se haya completado la decantación del líquido, los productos filtrados se guardan para futuros ensayos dentro de un recipiente de polietileno limpio y seco y se cierra el recipiente por medio de un tapón o de una tapa bien ajustada.

❖ **Determinación de la sílice disuelta**

❖ **Método gravimétrico**

- Se transfieren 100 ml de la solución diluida a una cápsula de evaporación, se añaden de 5 a 10 ml de HCl concentrado y se evapora hasta la sequedad en un baño de vapor.
- A continuación se vierte inmediatamente de 10 a 20 ml de HCl (1:1) sobre el residuo.
- Se cubre la cápsula y se digiere durante 10 en el baño o en una estufa.
- Se diluye la solución con un volumen de agua caliente, se filtra inmediatamente, se lava bien la sílice separada con agua caliente y se guarda el residuo.
- Se evapora nuevamente el producto filtrado hasta la sequedad y se pone el residuo durante una hora en un horno a una temperatura entre 105 y 110 ° C.
- Se trata el residuo con 10 a 15 ml de HCl (1:1) y se calienta en un baño de vapor o en una estufa.
- Se diluye la solución con un volumen igual de agua caliente, y se recupera y lava la pequeña cantidad de SiO₂ que contenga con la ayuda de otro papel de filtro.
- Se trasfiere los papeles que contienen el residuo a un crisol plástico.
- Se secan y se queman a una temperatura baja hasta que el carbón del papel de filtro se haya consumido completamente sin producir llama.

- Se trata el SiO_2 obtenido de esta manera, que contiene pequeñas cantidades de impurezas, en el crisol, con unas cuantas gotas de agua, alrededor de 10 ml de HF y una gota de H_2SO_4 y se evapora cuidadosamente hasta la sequedad.
- Finalmente, se calienta el pequeño residuo a una temperatura comprendida entre 1050 y 1100 °C por 1 ó 2 minutos; se enfría y se le mide la masa. La diferencia entre esta masa y la obtenida previamente representa la cantidad de SiO_2 .
- Se hace una determinación en la solución testigo, siguiendo el mismo procedimiento y usando la misma cantidad de la solución diluida para la solución testigo y las mismas cantidades de reactivos.

CÁLCULOS

$$S_C = (M_1 - M_2) \cdot 3330$$

Donde:

S_C : concentración de SiO_2 en milimoles por litro en el producto filtrado original.

M_1 : gramos de SiO_2 encontrados en la solución diluida

- La solución diluida analizada es equivalente a 5 ml del producto filtrado original y contiene $(M_1 - M_2)$ gramos o $(M_1 - M_2) \cdot 1000 / 60.06$ milimoles de SiO_2 ; por consiguiente, un litro del producto original contiene $1000/5 \cdot 1000 / 60.06 (M_1 - M_2)$ ó $3300 (M_1 - M_2)$ milimoles SiO_2 .

- **Reducción en alcalinidad**

Fotografías 17 y 18. Titulación de las muestras



- Se pasa una parte alícuota de 20 ml de solución diluida a un erlenmeyer de 125 ml; se añaden 2 a 3 gotas de solución de fenoltaleína y se titula con solución de 0.05 N de HCl hasta el cambio del color de la fenoltaleína.
- Se calcula la reducción en alcalinidad como sigue:

$$R_c = \frac{20N}{V_1} * (V_3 - V_2) * 1000$$

Donde:

R_c = reducción en alcalinidad, en milimoles por litro.

N = normalidad del HCl usado para titular.

V_1 = mililitros de la solución diluida.

V_2 = mililitros de HCl usado para obtener el punto final de fenolftaleína en la muestra de ensayo.

V_3 = mililitros de HCl usado para alcanzar el punto final de fenolftaleína en la solución de referencia.

El procedimiento y el método de cálculo antes descritos se deben seguir para obtener los valores de R_c que se deben usar, junto con los valores de S_c , para calcular la reactividad potencial de los agregados. Puede obtenerse información

adicional si se hace una titulación hasta el punto final del anaranjado de metilo y se efectúa los cálculos correspondientes. Después de que se alcance el punto final de fenolftaleína, se añaden 2 ó 3 gotas de solución de anaranjado de metilo (0,1 g de anaranjado de metilo en 100 ml de agua) y se titula hasta el punto final del anaranjado de metilo.

3.3.2 Ensayo de Compresión

Este ensayo mide el comportamiento del mortero de cemento hidráulico, bajo cargas de compresión.

Se emplearon probetas en forma de cubos de 50 mm de lado, las cuales fueron fundidas conforme a la norma NTC 220 (Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm de lado). En los procedimientos de mezclado, preparación y almacenamiento de las probetas se respetaron cuidadosamente los requerimientos de la norma.

El procedimiento de ensayo de las probetas se realizó en la máquina universal de ensayos TREBEL (Fotos 19 y 20), dentro de los rangos de velocidad y carga permitidas. En la evaluación de los resultados se debieron tomar en cuenta las indicaciones complementarias de la misma norma en cuanto a los cubos defectuosos y sus correspondientes valores de aceptación.

La resistencia a compresión de los morteros se evaluó para 7, 14 y 28 días, debido a la gran influencia que posee dentro de las diferentes propiedades del mortero y la gran importancia para la caracterización de una mezcla.

Fotografía 19 y 20. Máquina Universal de Ensayos TREBEL



3.3.3 Ensayo de Flexión

Esta prueba determina la resistencia a la flexión de un mortero de cemento hidráulico. Las probetas empleadas son de una longitud de 16 cm. y una sección cuadrada de 3.555 cm², las cuales fueron fundidas conforme a la norma NTC 120 (Método para determinar la resistencia a la flexión de morteros de cemento hidráulico), empleando los accesorios correspondientes, tales como molde, compactador, guías del compactador, etc.

En los procedimientos de mezclado, preparación y almacenamiento de las probetas se respetaron cuidadosamente los requerimientos de la norma.

El procedimiento de ensayo de las probetas se realizó en la máquina universal de ensayos TREBEL (Foto 21), dentro de los rangos de velocidad y carga permitidos. Debido a la dificultad en la consecución del dispositivo para el apoyo de las probetas en el momento de la aplicación de la carga, recomendado por la norma, éste fue reemplazado por un montaje realizado con materiales encontrados en el laboratorio, y que cumple plenamente con la función deseada. En la evaluación de los resultados se debieron tomar en cuenta las indicaciones complementarias de la misma norma en cuanto a las probetas defectuosas y sus correspondientes valores de aceptación.

Fotografía 21. Montaje Ensayo de Flexión



Para la realización de este ensayo, y ante una evaluación de sus cambios a lo largo del tiempo, esta prueba se evaluó para 7,14 y 28 días.

3.3.4 Ensayo de Tracción

Este ensayo determina el comportamiento del mortero de cemento hidráulico, bajo cargas de tensión.

Las probetas utilizadas en este ensayo se deben fundir de acuerdo a la norma NTC 119 (Método para determinar la resistencia a la tensión de morteros de cemento hidráulico).

La cantidad de agua empleada debe ser conforme a la norma, modificando el diseño escogido; de otra forma, se alteraría la consistencia de las probetas, haciendo imposible el llenado de los moldes y su posterior compactación. Dicha cantidad de agua se selecciona a partir de las proporciones de cemento y arena utilizada, y el porcentaje de agua necesario para producir una pasta de cemento de consistencia normal.

En los procedimientos de mezclado, preparación, llenado, compactación y almacenamiento de las probetas se respetaron cuidadosamente los requerimientos de la norma.

El procedimiento de ensayo de las probetas se realizó en la máquina universal de ensayos TREBEL (Foto 22), siendo adaptada a las correspondientes exigencias de la norma NTC 119 cumpliendo los requerimientos necesarios para tal fin y dentro de los rangos de velocidad y carga permitidos. En la evaluación de los resultados se debieron tomar en cuenta las indicaciones complementarias de la misma norma en cuanto al tratamiento de las probetas y su selección.

Esta propiedad de los morteros se evaluó para 7,14 y 28 días, siendo los más representativos de su comportamiento.

Fotografía 22. Montaje Ensayo de Tracción



3.3.5 Ensayo de Porosidad

Esta prueba permite determinar la porosidad de muestras de morteros empleando el Porosímetro de campo Ruska (Fotografía 23).

Fotografía 23. Porosímetro de Campo Ruska



▪ Principio del Método

Esta práctica se basa en la ley de Boyle para determinar la porosidad. Las medidas obtenidas son valores de porosidad efectiva. La determinación de la porosidad

consiste en la medida del volumen de sólidos o granos de la muestra seguida por una medida del volumen total de la muestra.

Los equipos, elementos y accesorios empleados fueron: Porosímetro de campo Ruska, frasco con mercurio, picnómetro y vasija metálica, guantes profilácticos y muestras de mortero previamente preparadas y reseñadas.

▪ **Procedimiento Experimental:**

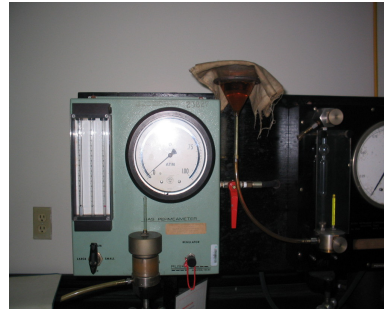
- Se fabricaron probetas cúbicas de 5 cm de lado y se sometieron a un curado de 28 días. De cada cubo, se cortaron tres probetas cúbicas de 2 cm de lado, previo descarte de la parte superior e inferior de la probeta.
- Quitar la copa del manómetro y llenar el pozo con unas pocas gotas de mercurio triple destilado y ajustar nuevamente el manómetro.
- Chequear que el porosímetro esté en buenas condiciones de operación (que no haya fugas en el sistema al colocar presión).
- Seleccionar la copa más pequeña que pueda alojar la muestra y ajustarla vacía al porosímetro.
- Con la válvula de descarga abierta, llevar el pistón un poco más atrás de la posición de operación. Cada copa tiene su propia posición de inicio según sea: copa pequeña: 150, copa media: 250, copa grande: 400.
- Llevar el mecanismo del pistón hacia delante hasta su posición de inicio y no retroceder para evitar el backflash.
- Cerrar la válvula de descarga y llevar el pistón hacia delante hasta que la lectura de la manga micrométrica sea cero (0). El nivel de mercurio alcanzado es tomado como referencia: lleve la marca del nivel hasta este punto.

- Abrir la válvula de alivio suavemente antes de llevar el pistón un poco más atrás de su respectiva posición de inicio.
- Colocar el corazón o muestra dentro de la copa ajustada a cero y anclarla al bloque del manifold.
- Con la válvula de alivio abierta llevar el pistón hacia delante hasta su posición de inicio correspondiente, sin retroceder. (Todas las lecturas durante la operación se deben hacer con el pistón moviéndose hacia delante para evitar el efecto backflash y el ajuste a cero debe repetirse para cada copa y ocasionalmente durante la operación del instrumento).
- Cerrar la válvula de alivio y llevar el pistón suavemente hacia delante hasta alcanzar el nivel de mercurio de referencia anterior, se debe registrar la medida del micrómetro como R_{core} que es proporcional al volumen de sólidos de la muestra. Abrir la válvula de alivio y retirar la copa del manifold.
- Colocar el picnómetro dentro de la vasija y llenarlo de mercurio. Luego se introduce la muestra dentro del picnómetro y se mide el volumen bruto de la muestra. El volumen de mercurio recogido de la vasija (desalojado del picnómetro) se lleva a la respectiva copa usada para obtener el R_{core} y se ajusta la copa al bloque del manifold.
- Se repiten los pasos anteriores y se obtiene un estimativo proporcional al volumen de mercurio en la copa, el volumen bruto de la muestra se designa como R_{Hg} .

3.3.6 Ensayo de Permeabilidad

Este ensayo permite determinar la permeabilidad de morteros, mediante la utilización del Permeámetro de gas Ruska.

Fotografía 24 y 25. Permeámetro de Gas Ruska



- **Principio del Método:**

La permeabilidad al gas de una muestra de mortero se determina con base en la ley de Darcy (flujo de fluidos), midiendo en un rotámetro la tasa de flujo de un gas que se hace pasar a través de la muestra bajo un gradiente de presión. El gas a utilizar es de viscosidad conocida.

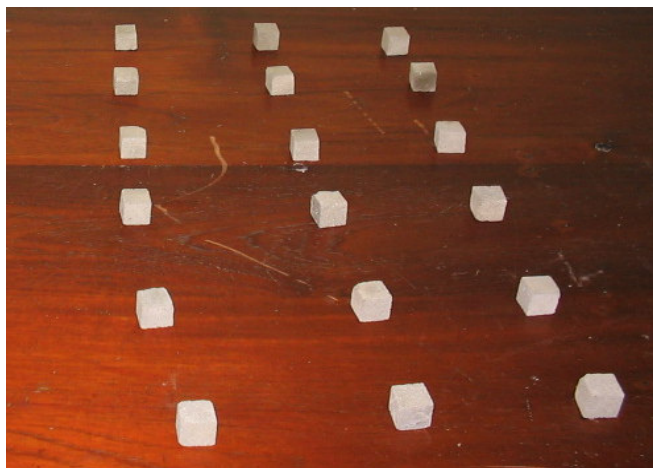
El valor de permeabilidad que se determina en este equipo es de permeabilidad absoluta. La permeabilidad se calcula utilizando el caudal de gas que pasa a través del núcleo, las dimensiones del mismo, el gradiente de presión y la viscosidad del gas.

Los equipos, elementos y accesorios empleados fueron: Permeámetro de gas Ruska con todos sus accesorios y muestras de mortero previamente preparadas y reseñadas.

▪ **Procedimiento Experimental:**

- Se fabricaron 3 probetas cúbicas de 5 cm de lado y se sometieron a un curado de 28 días por cada tipo de mortero. De cada cubo se cortó una probeta cúbica de 2 cm. de lado, previo descarte de la parte superior e inferior de la probeta (Fotografía 26).
- Colocar la muestra en el receptor de caucho adecuado (el más preciso), insertar en la copa y ajustar en el permeámetro.
- Se debe comenzar por probar la posición de “large” de la válvula selectora del flowmeter y fijar una presión de 0.25 atmósferas en el manómetro. Si el flotador se encuentra en el rango de lectura entre 20 y 140 divisiones, tomar la lectura estimando el centro del flotador suspendido; de lo contrario, probar la posición “medium” y fijar una presión de 0.50 atmósferas, verificar si se puede tomar la lectura; de lo contrario, probar la siguiente posición “small”, fijando para esta una presión de 1 atmósfera y tomar la lectura.
- Cerrar la válvula reguladora y retirar la muestra.

Fotografía 26. Probetas cúbicas Ensayo de Permeabilidad



3.3.7 Ensayo de Absorción Capilar

Este ensayo permite medir la cinética de absorción de agua en morteros y hormigones.

El proceso de absorción capilar se considera como la masa de agua por unidad de área que puede ser absorbida y transmitida por los poros capilares del hormigón cuando éste se encuentra en contacto con el agua.

- **Principio del Método:**

El método aplicado para evaluar las características de absorción en morteros está basado en la normativa Sueca, mediante Fagerlound, quien describe el proceso de absorción de agua en morteros y hormigones a través de tres coeficientes: m (resistencia a la penetración del agua), k (coeficiente de absorción capilar) y ε_e (porosidad efectiva).

El ensayo se debe realizar sobre probetas de espesor menores a $H = 50\text{mm}$ (20 - 30 mm), después de un pre-acondicionamiento para reducir la humedad inicial.

Independientemente de la forma de succión capilar, horizontal o vertical, se define la relación entre la profundidad de penetración, z (m), y el tiempo t (seg), como:

$$m = \frac{t}{z^2} \quad (\text{s} / \text{m}^2)$$

Donde m representa la resistencia a la penetración del agua, s/m^2 . El coeficiente m puede ser determinado calculando el tiempo requerido para que el agua ascienda a la cara superior de la prueba; es decir, cuando z corresponde al espesor de la probeta.

La resistencia a la penetración del agua, m , se considera que es función de la estructura del poro más no de la porosidad total. Así con poros más finos, la penetración del agua es más lenta y “ m ” será mayor.

El coeficiente de absorción capilar, k , en $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$, está dado por:

$$k = \frac{Q_n - Q_o}{A} * \frac{1}{\sqrt{t}} \quad (\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$$

El coeficiente de absorción capilar, k, es función de la porosidad total, del estado de humedad inicial y de la estructura de los poros.

La porosidad efectiva, ε_e , se puede calcular como:

$$\varepsilon_e = (k \sqrt{m}) / 1000$$

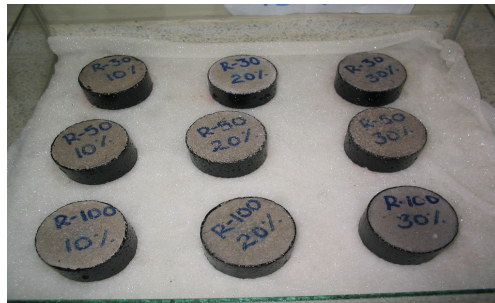
Con la anterior información la absorptividad (absorción capilar), S, puede calcularse como:

$$S = \frac{1}{\sqrt{m}} \quad (\text{mm/h}^{1/2}) \text{ ó } (\text{m/s}^{1/2})$$

▪ **Procedimiento Experimental:**

- Se fabricaron probetas cilíndricas de 7.5 cm de diámetro y 15 cm de altura y se sometieron a un curado de 28 días. De cada cilindro se cortó una probeta de espesor (3 cm), previo descarte de la parte superior e inferior de la probeta.
- Cada probeta fue sometida a un preacondicionamiento inicial de secado a 105^a C durante 6 horas, posteriormente se sellaron las caras laterales de cada probeta mediante la aplicación de un producto impermeabilizante; finalmente, se secaron las muestras a 50° C durante 24 horas y se enfriaron en desecador, antes de registrar su peso inicial.
- El método de ensayo consiste en colocar las muestras sobre una esponja de aproximadamente 5 mm de espesor, saturada de agua, y en un recipiente cubierto para evitar la evaporación. El nivel del agua deberá estar 3 mm. por encima de la cara inferior de la probeta y se registró el peso a intervalos de 5, 10, 15, 30 (minutos), 1, 2, 3, 4, 6, 24, 48, 72, 96, 120, 144, 168 horas. Se puede observar el montaje en la Foto 27.

Fotografía 27. Montaje Ensayo de Absorción Capilar.



3.3.8 Ensayo de Solidez Bajo la Acción de Sulfatos

Este ensayo permite determinar la resistencia a la desintegración de los agregados y la solidez ante cambios de temperatura, por la acción de soluciones saturadas de sulfatos (de sodio o de magnesio), simulando el probable desgaste al que pueden presentar las estructuras de morteros y hormigones en presencia de diferentes condiciones ambientales y ataques físico-químicos. Norma INVÍAS 713, ASTM C88. Los equipos, elementos y accesorios empleados fueron: Horno, balanza con aproximación de 0.1g., malla de material sintético, sulfato de sodio.

▪ Procedimiento Experimental:

- Las probetas utilizadas fueron cubos de 5 cm de lado, curados durante un período de 28 días. Por cada tipo de mortero se tomaron dos especímenes, para un total de 20 probetas.
- La solución saturada de sulfato de sodio se prepara disolviendo 350g. de sal anhidra por litro de agua y se deben añadir a intervalos de tiempo de tal manera que permitan diluir la cantidad de sulfato agregada al agua, sin quedar cristales en la solución. Se debe dejar en reposo por 48 horas.

- Las muestras se colocan sobre la malla, se marcan y se sumergen en la solución de sulfato de sodio, durante un período no menor de 16 horas ni mayor de 18 horas. El recipiente se debe cubrir para evitar la evaporación y la contaminación de sustancias externas (ver Fotos 28 y 29).

Fotografías 28 y 29. Montaje Ensayo de Solidez a Sulfatos



- Después del período de inmersión se sacan las muestras de la solución, se dejan escurrir durante 15 ± 5 minutos y se introducen en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ \text{C}$ hasta obtener peso constante.
- Se sumergen de nuevo las muestras en la solución y se repite el procedimiento durante 7 días. Al finalizar los ciclos se deben lavar las probetas para retirar los residuos de sulfatos y se deben llevar al horno hasta obtener peso constante.

3.3.9 Ensayo para Determinar el Coeficiente de Difusión y Permeabilidad al Ion Cloruro

Esta prueba nos permite evaluar el coeficiente de difusión y la permeabilidad al anión cloruro en pastas de morteros y concretos, parámetros que determinan la durabilidad de las estructuras que pueden estar sometidas a agentes corrosivos y que deben ser estudiados especialmente para el diseño y construcción de éstas.

El método de ensayo en celda de difusión manual es considerado como el método más apropiado para estudiar a escala de laboratorio la velocidad de difusión del ión cloruro, pero presenta como desventaja el excesivo tiempo de ensayo, que puede tomar hasta años según el material evaluado.

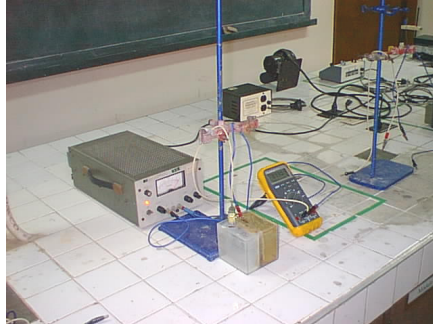
Esta técnica consiste en colocar un disco del material que separa un sistema de doble celda que contiene en los dos compartimentos una solución de prueba (o solución simulada en poro de concreto), recomendándose la utilización de una solución saturada de hidróxido de calcio Ca(OH)_2 ; una de las semiceldas contiene además de la solución de prueba, la fuente de cloruros (NaCl).

- **Método del Ensayo modificado de permeación a cloruros en materiales cementíticos**

En 1983 se adoptó como norma AASHTO-T277, el uso de voltaje para acelerar el transporte de los iones cloruro en la celda de difusión; posteriormente, esta técnica fue aceptada como norma ASTM C1202.

La prueba rápida de permeación a cloruros, mediante la aplicación de un campo eléctrico externo consiste en una pequeña celda de difusión, a la que se suministra una diferencia de potencial constante de 12 voltios a través de un disco de mortero y se registra la corriente en función del tiempo, al igual que la concentración de cloruros mediante titulación química (ver Foto 30).

Fotografía 30. Montaje Prueba Rápida de Permeación a Cloruros



- **Determinación del coeficiente de difusión y evaluación de la permeabilidad al ión cloruro.**

El transporte de los iones a través del concreto depende del tipo de mecanismo: si es por difusión o conducción (migración), según las bases de la electroquímica.

La difusión está sujeta a un gradiente de concentración y puede describirse mediante las leyes de Fick de la siguiente manera:

A condición de estado estacionario la primera ley de Fick:

$$J = -D \frac{dC}{dX}$$

donde J representa el Flujo iónico, moles/m²s; D la difusividad del ion, m²/s; dC/dX el gradiente de concentración, mol/m³ m, pudiéndose asumir un coeficiente de actividad de 1.0

A condición de estado no estacionario, tenemos la segunda ley de Fick:

$$\frac{dC}{dt} = D \left(\frac{d^2C}{dX^2} \right)$$

donde t es el tiempo en segundos. Esta segunda condición se ajusta en mayor grado a la realidad práctica del concreto en obra.

La conducción se refiere a la movilidad de los iones bajo un campo eléctrico, en cuyo caso el flujo puede determinarse según:

$$J = C \mu \Delta E$$

Siendo μ la movilidad del ion, $m^2/V.s$; y E el gradiente de voltaje, V/m. La movilidad puede expresarse como:

$$\mu = zFD/RT$$

donde z es la carga del ion (-1 para el anión cloruro), eq/mol; F es la constante de Faraday (23063 cal/V.eq); R es la constante de los gases (1.9872 cal/ mol^o K) y T es la temperatura en ^o K.

La ecuación de Nernst-Planck combina dos conceptos para calcular el flujo iónico como son la acción del campo eléctrico y el gradiente de concentración, y se expresa como:

$$J = D \frac{zFE(x)C(x)}{RT} - D \frac{dC}{dX}$$

donde E(x) y C(x) representan el potencial y la concentración respectivamente, como función de x.

Un ensayo en celda manual de difusión; es decir, sin aplicación de voltaje y con espesor reducido, podrá considerarse como una prueba de difusión en condición de estado estacionario.

Al aplicar voltaje se incrementa la conducción, y si las probetas son de espesor reducido (menor de 10 mm.), el estado estacionario se alcanzará relativamente rápido. En este caso, podemos aplicar la ecuación anterior de Nernst-Planck asumiendo que la difusión es prácticamente despreciable; por lo tanto, el coeficiente de difusión (D_{eff}) se puede calcular como:

$$D_{\text{eff}} = \frac{JRTL}{zFC \Delta E \gamma} \quad (\text{m}^2/\text{s})$$

Ecuación en la cual se expresa $\Delta E(x)$ como E/L , donde L representa el espesor del espécimen (cm), γ es el coeficiente de actividad que se asume como 1.0.

Para el desarrollo del ensayo, los equipos, elementos y accesorios empleados fueron: Fuente de voltaje de 12 voltios, multímetro digital, celda de difusión de acrílico de dimensiones 9x9x9 cm., electrodos de acero inoxidable, cables y conexiones, solución saturada de hidróxido de calcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, cloruro de sodio $[\text{NaCl}]$, dicromato de potasio, nitrato de plata.

▪ **Procedimiento experimental:**

- Se utilizaron probetas cilíndricas de 7.5 cm de diámetro y 15 cm de altura y se sometieron a un curado de 28 días. De cada cilindro se cortó una probeta de aproximadamente 1 cm de espesor, previo descarte de la parte superior e inferior de la probeta. Se sellaron con parafina las zonas no expuestas directamente a las disoluciones.
- Para el montaje de las celdas de difusión, se utilizaron disoluciones de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (1.85 g/L) de elevada alcalinidad, y $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de igual concentración + NaCl 3% (ver Foto 31), cada una en volumen de 270 ml; se montaron los electrodos de acero inoxidable y se aplicó una diferencia de potencial eléctrico constante de 12 Voltios. Se mantuvo el sistema a temperatura ambiente a lo largo de las 72 horas que duró el ensayo.

Fotografía 31 y 32. Soluciones Utilizadas Prueba de Difusión de Cloruros y Multímetro Digital



- Se registró la corriente a intervalos de 2 horas mediante un multímetro digital (ver Foto 32). Al mismo tiempo se tomó una parte de alícuota, del compartimiento de Ca(OH)_2 , para análisis del contenido del anión cloruro, mediante titulación química. El volumen en la celda se mantuvo constante, a lo largo del ensayo, mediante la reposición permanente del volumen consumido de la disolución.

4 ADECUACIÓN DEL VIDRIO

Teniendo en cuenta las investigaciones llevadas a cabo en la universidad de Columbia (New York), en la cual se utilizó vidrio reciclado como agregado en el hormigón y donde se pudo comprobar la reacción entre cierto tipo de sílice que se encuentra en el vidrio con los álcalis contenidos en el cemento, conocida como Reacción Álcali-Sílice (**R.A.S.**). Se decidió analizar el grado de potencialidad reactiva del vidrio que se utilizaría en la realización de las mezclas de mortero.

4.1 REACCIÓN ÁLCALI-SÍLICE

Desde hace algunas décadas, varios de los profesionales dedicados al estudio de la tecnología del hormigón se han preocupado y dedicado específicamente al estudio de la reacción álcali-agregado, cuya manifestación más frecuente y conocida es la reacción álcali-sílice (en adelante **R.A.S.**). Esta reacción, que en casos extremos puede ocasionar serios problemas estructurales y económicos, sólo puede generarse en estructuras construidas con hormigón elaborado a partir de un conjunto de materiales componentes (cemento Pórtland, agua, agregados, adiciones minerales y aditivos) capaces de combinarse químicamente y formar un compuesto que incrementa su volumen con la humedad denominado "gel de **R.A.S.**". Es por esto, que la **R.A.S.** sólo preocupa en aquellas estructuras de hormigón, que durante al menos, por un largo período de su vida en servicio estará en forma permanente o periódica en contacto con agua o suelos húmedos o atmósferas con alta humedad relativa.

En el sentido estricto de la palabra, las **R.A.S.**, ocurren entre los hidróxidos de álcalis producidos por el cemento Pórtland al hidratarse y ciertas rocas y minerales silíceos presentes en los agregados utilizados en la producción de concreto o desde el exterior a través del agua o suelo de contacto y pueden reaccionar con ciertos

Componentes potencialmente reactivos de algunos agregados. Se incluyen en esta lista, entre otros el opal, cuarzo deformado, chert, calcedonia, tridimita y cristobalita.

Primero, la sílice reacciona con el hidróxido y el álcali del cemento hidratado formando un gel de sílice. Luego, el gel absorbe el agua causando presiones de expansión e hidráulicas suficientes para facturar el concreto.

4.1.1 Consecuencias de la R.A.S.

La **R.A.S.** aparece usualmente entre los 5 y 15 años después de la fundición del concreto y comúnmente es mal diagnosticada, debido a que son varios los factores que contribuyen al problema. Estos son:

- ✓ Agregados reactivos
- ✓ Cemento con un alto contenido de álcali
- ✓ Fuente de álcali externas
- ✓ Medios marinos
- ✓ Condiciones climáticas (hielo-deshielos/ciclos de humedecimientos y secado)
- ✓ Agentes causantes de corrosión como sales de deshielo y cloruros.
- ✓ Cargas de tráfico

Más allá de algunas sutiles diferencias, en el ámbito científico-técnico existe una razonable coincidencia en que para analizar la aptitud del agregado para ser utilizado en estructuras, donde existe posibilidad de R.A.S. se realice un análisis químico para determinar la reactividad potencial de los agregados.

4.2 MÉTODO QUÍMICO PARA DETERMINAR LA REACTIVIDAD POTENCIAL DEL VIDRIO.

Para los agregados no importa de qué tipo, la condición de inertes es muy importante, porque implica que no deben reaccionar químicamente con los componentes del cemento, ya que si esto ocurre pueden presentarse fenómenos que lleven a la desintegración del mortero. Es particularmente peligrosa la reacción álcali-sílice.

Esta es la razón para que las normas ICONTEC para la rama de la construcción limiten el contenido de álcalis en estos últimos.

Se han propuesto varios métodos para determinar la reactividad potencial. Sin embargo, no proporcionan información cuantitativa sobre el grado de reactividad que se puede esperar o tolerar en condiciones de servicio. Por consiguiente, la evaluación de la reactividad potencial de un agregado debe basarse en el criterio y en la interpretación de resultados experimentales y en el examen de estructuras de concreto con las mismas proporciones de agregados y cemento que se vayan a utilizar en la práctica.

La norma ICONTEC 175 (Método químico para determinar la reactividad potencial de los agregados) consiste en un ensayo que determina la reactividad potencial de los agregados con álcalis en concretos y morteros de cemento. Esto, mediante la determinación de la sílice disuelta y la reducción de la alcalinidad, en cualquier tipo de agregado, bien sea grueso o fino, y con base en estos resultados se establece el grado de reacción de dicho agregado con los álcalis del cemento.

En cuanto al ensayo, la muestra, al entrar en contacto con una solución base, sufre una reducción en su alcalinidad en mayor o menor grado. La sílice disuelta está determinada por la presencia de cristales amorfos (químicamente el cristal precipitado no es perfecto) ante un reactivo tipo.

El ensayo se realizó sobre una muestra de vidrio de botellas que fueron previamente trituradas, utilizando aquél que pasó por el tamiz No. 50 y el retenido por el tamiz No. 100. Para mayores detalles ver descripción del proceso en el capítulo de etapa experimental.

- **Reducción de la alcalinidad para el Vidrio Molido sin tratar.**

A la solución que contiene la muestra se añaden 3 gotas de fenolftaleína y se titula con una solución 0.05 N de HCL hasta el cambio del color de la fenolftaleína.

Cálculo de la reducción alcalina:

$$Rc = (20 \cdot N / V1) \cdot (V3 - V2) \cdot 1000 \text{ (milimoles por litro)}$$

Donde:

Rc = Reducción de la alcalinidad, milimoles por litro.

N = Normalidad de HCl usado para titular

V1 = Mililitros de solución diluida en la muestra.

V2 = Mililitros HCl usado para obtener el punto final de fenolftaleína en la muestra de ensayo.

V3 = Mililitros HCl usado para alcanzar el punto final de fenolftaleína en solución de referencia.

DATOS: N = 0.01 V3= 19 ml V1= 20 ml

CÁLCULO TIPO:

Muestra 1: V2=?

$$Rc = (20 \cdot 0.01 / 20) \cdot (19 - V_2) \cdot 1000$$

Se analizan tres muestras dando los siguientes resultados:

Tabla 16. Datos Rc para el vidrio sin tratar

MUESTRA	V ₂ (ml)	Rc (ml/l)
1	13.7	53
2	13.7	53
3	13.8	52

El promedio de los valores de Rc es 52.67 milimoles por litro.

- **Sílice Disuelta, para el Vidrio Molido sin tratar.**

A la muestra de ensayo se la agrega HCl y se introduce al horno; el remanente sólido se lava nuevamente con HCl y se quema; a continuación, se añaden 10 ml de HF y una gota de H₂SO₄; se somete al calor hasta la sequedad y se pesa.

La concentración de SiO₂ en la solución de NaOH filtrada del agregado se calcula como sigue:

$$Sc = (W1-W2)*3330 \text{ (milimoles por litro)}$$

Donde:

Sc = Concentración de SiO₂ en milimoles por litro en el producto original.

W1 = Gramos de SiO₂ encontrados en mililitros de la solución diluida de la muestra.

W2 = Gramos de SiO₂ encontrados en la solución testigo.

DATOS:

$$W_2 = 0.089$$

Se obtuvo los siguientes resultados de las tres muestras analizadas.

Tabla17. Datos Sc para el vidrio sin tratar.

MUESTRA	W_1 (gr.)	Sc(ml/l)
1	0.098	29.7
2	0.099	23.1
3	0.096	33

El promedio de los valores de Sc. es 28.6 milimoles por litro.

Los resultados de los ensayos se consideran satisfactorios, si ninguno de los tres valores de Rc y Sc difieren del promedio de los tres en más de las siguientes cantidades:

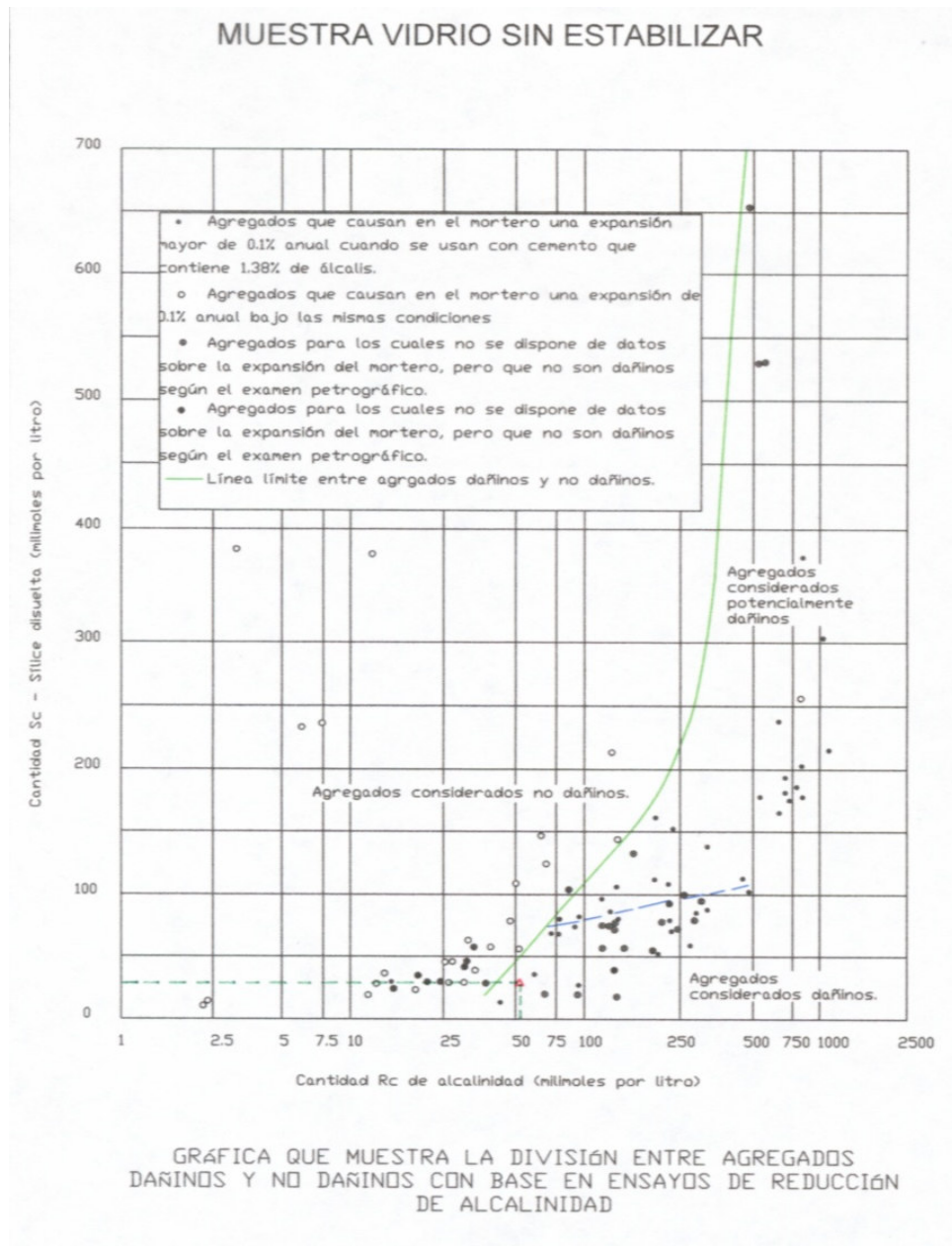
- Cuando el promedio es cien milimoles o menos, doce milimoles por litro.
- Cuando el promedio es cien milimoles por litro o mayor, 12%

Al comparar $R_c = 52.67$ y $Sc = 28.6$ milimoles/litro con los resultados de las muestras, se puede considerar aceptables los datos.

- **Análisis de resultados**

Las muestras analizadas caen en la zona derecha de la línea límite (en la gráfica 5); por lo tanto, en vidrio molido sin tratar se considera como agregado dañino.

Gráfica 5. Sílice Disuelta Vs. Reducción Alcalina para el Vidrio sin tratar.



4.3 ESTABILIZACIÓN DEL VIDRIO MEDIANTE LA IMPREGNACIÓN DE ESTIRENO.

Luego de comprobar que el vidrio es un agregado potencialmente dañino, se decidió estabilizar su comportamiento adecuándolo por medio de un tratamiento químico que elimina su reactividad con los álcalis del cemento.

Existen numerosos productos para lograr este fin, principalmente un polímero de látex, el monómero Estireno y actualmente un aditivo de Litio. Se optó por el uso del Estireno, ya que es el más económico de los polímeros rígidos, es de producción nacional y fácil disponibilidad y ante todo porque se conoce su comportamiento en experiencias similares, pues el Estireno se emplea en la industria del plástico reforzado, y desempeña la función vital de permitir a la resina endurecerse del estado líquido al estado sólido, por reticulación de las cadenas moleculares de poliéster, sin generación de subproductos, siendo un material que no afecta las propiedades del vidrio y, por el contrario, contribuye a mejorar algunos de sus aspectos menos favorables. También, existen antecedentes sobre el uso del Estireno en el concreto, específicamente en la Universidad Industrial de Santander¹, donde se han realizado proyectos de grado sobre este tema cuyos resultados han sido:

- Mejoramiento de la resistencia a la compresión hasta un 300%
- Mejoramiento de la resistencia a la tensión hasta un 500%

¹ **CABALLERO**, Pedro Alberto, **RÁMIREZ GARCÍA**, Alvaro y **BUITRAGO**, Juan de Jesús. Tesis: Mejoramiento de las Propiedades del Concreto Mediante la Adición de un Material Polimérico. Ingeniería Civil. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 1975.

- Mejoramiento de la resistencia a los ácidos
- Además se logró adecuar la reacción álcali-agregado, para la utilización de la fibra de vidrio tipo “E” como refuerzo de mortero²

4.3.1 EL ESTIRENO

El estireno es un líquido transparente e incoloro que puede obtenerse como derivado del petróleo y del gas natural, pero que también se encuentra en la naturaleza como tal. El estireno ayuda a producir materiales plásticos utilizados en miles de productos que se caracterizan por su bajo peso, su flexibilidad y su extraordinaria resistencia, y que son vitales para nuestra salud y bienestar.

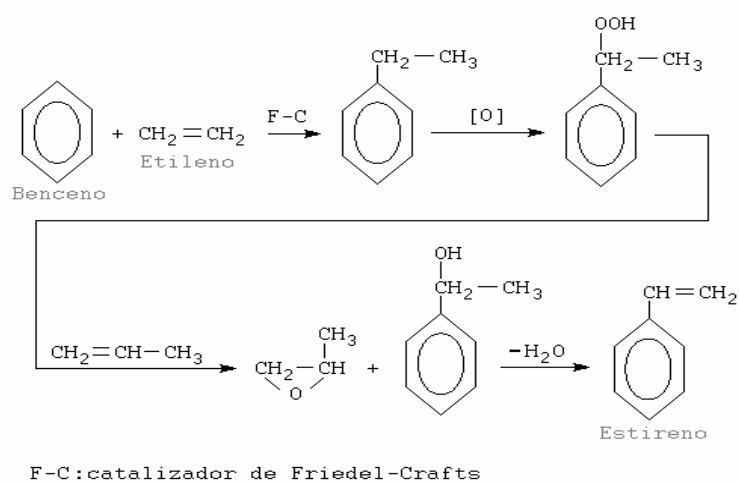
De la polimerización del estireno se obtiene el poliestireno que es un plástico. Existen diferentes tipos dependiendo de la disposición espacial de los grupos fenilo (poliestireno atáctico y sindiotáctico). Asimismo, existen otros tipos de poliestireno dependiendo de los aditivos utilizados en el proceso de fabricación y del proceso de fabricación en sí. Además, el poliestireno es la base de diversos copolímeros (estireno-acrilonitrilo). Probablemente, sea el plástico más popular después del polietileno.

El monómero **estireno**³ se obtiene a partir de **etileno** y **benceno** y en el laboratorio se produce a partir de la destilación seca del ácido Cinámico mediante el siguiente proceso:

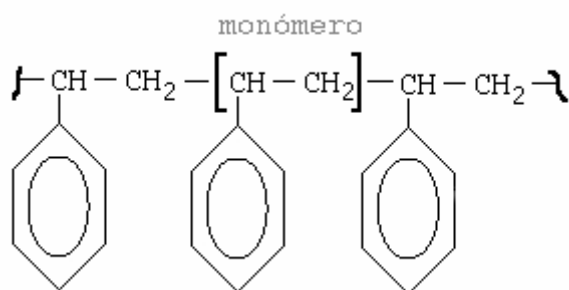
² **VIANCHA SALAZAR**, Gustavo Adolfo y **OLARTE DIAZ**, Edgar. Tesis: Adecuación de la Fibra de Vidrio Tipo “E” Como Refuerzo del Mortero para su Utilización en la Fabricación de Elementos Delgados. Ingeniería Civil. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 1996.

³ BASF, Chile S.A, Información técnica sobre el estireno. Santiago de Chile, 2003.

Gráfica 6. Polimerización del estireno



El estireno se polimeriza lentamente a temperatura ambiente. Su velocidad de polimerización aumenta al aumentar la temperatura. El poliestireno es el producto resultante de la polimerización del estireno. Tiene la siguiente fórmula:



- **PROPIEDADES DEL ESTIRENO**

El estireno es un líquido incoloro, con olor característico, fuertemente refringente, insoluble en agua y miscible con la mayoría de los disolventes orgánicos. El producto se polimeriza al calentar, pero también a temperaturas normales, aunque lentamente.

- ❖ Líquido entre incoloro y amarillo aceitoso.
- ❖ Resistencia a la tensión 8000 – 9000 psi
- ❖ Elongación 2.6 –3.5%
- ❖ Módulo de Elasticidad 4.5×10^5 psi
- ❖ Dureza Rockwell 70 – 80
- ❖ Resistencia a la Flexión 13000 –14000 psi
- ❖ Punto de ebullición 145°C
- ❖ Punto de fusión -30.6°C
- ❖ Densidad relativa (agua = 1) 0.9
- ❖ Absorción de Humedad 0.04%
- ❖ Solubilidad en agua, g/100 ml a 25°C: 0.03
- ❖ Presión de vapor, Kpa. a 20°C: 0.7
- ❖ Densidad relativa de vapor (aire = 1): 3.6
- ❖ Densidad relativa de la mezcla vapor/aire a 20°C (aire = 1): 1.02
- ❖ Temperatura de auto ignición: 490°C
- ❖ Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 0.9-6.8

- **APLICACIONES DEL ESTIRENO.**

Además de su campo de aplicación principal para polímeros de estireno, se emplea preferentemente el estireno como diluyente de resinas de poliéster no saturadas, así como también disolvente para aditivos sólidos de estas resinas, como por ejemplo los acelerantes y la parafina, pudiéndose elaborar para tal fin en la forma en que se suministra; es decir, estabilizado con p-terc-butilpirocatequina. Además, se emplea para la esterilización de aceites secantes y resinas ácidas.

El estireno se utiliza para casi todo: desde envases alimentarios hasta componentes de automóviles, barcos y ordenadores.

Con él, se fabrican cajas para computadoras, maquetas, juguetes, recipientes de uso industrial y doméstico, recubrimientos de paredes, revestimientos internos de refrigeradores y otros muchos objetos y componentes.

4.3.2 ESTABILIZACIÓN DEL VIDRIO CON ESTIRENO.

Para lograr la estabilización del vidrio y evitar la **R.A.S** se procede a su impregnación con Estireno. Por medio de la impregnación se busca crear una película protectora de Estireno sobre las partículas de vidrio, teniendo en cuenta su resistencia a los álcalis.

- **Preparación del Estireno para impregnar el vidrio para la mezcla del mortero.**

Para la preparación del poliestireno que es la polimerización o endurecimiento del Estireno, se utilizó resina de poliéster que actúa como base para la polimerización del estireno, un acelerante de la reacción (sales de cobalto) y un catalizador que es el encargado de iniciar el desarrollo de la cadena polimérica.

Basados en estudios preliminares efectuados en la Universidad Industrial de Santander, se escogió el peróxido de MEK que es el iniciador más soluble en este polímero, en un porcentaje del 1% que, de acuerdo a estos estudios, es el porcentaje más óptimo en la polimerización del estireno.

- **Preparación del estireno y la resina.**

En la preparación del Estireno y la resina se deben tener en cuenta las siguientes proporciones según recomendaciones sugeridas por estudios realizados en la Universidad Industrial de Santander⁴.

⁴ CARVAJAL NIÑO, Leopoldo y LOAIZA CAMARGO, Jairo Iván. Tesis: Preparación y Caracterización de Concreto Liger (Agregado Liviano: Cascarilla de Arroz) Impregnado con Poliestireno. Universidad Industrial de Santander, 1975.

- ❖ 30% de Estireno para un kilo de resina
- ❖ 10 gramos de iniciador (peroxido de MEK, Metil Etil Cetona) por kilo de Estireno y resina
- ❖ 1 gramo de acelerante (sales de cobalto) por kilo de Estireno y resina

Estos productos se vierten dentro de una mezcladora y se agitan durante aproximadamente 3 minutos para garantizar la uniformidad de la mezcla.

- **Método de impregnación.**

Fotografía 33. Método de impregnación.



Luego se procede a la impregnación del vidrio molido.

Se ensayaron varios métodos para impregnar el vidrio en sus diferentes granulometrías, como:

- Aplicación directa con pistola y compresor.
- Inmersión de las partículas de vidrio en estireno.
- Impregnación mediante mezclado del vidrio molido con estireno.

Se observa que el método de impregnación mediante el mezclado del vidrio molido con estireno se efectúa de forma más rápida, óptima y con un mínimo de desperdicios.

Inicialmente, se procede a mezclar diferentes proporciones de estireno con vidrio molido hasta obtener los porcentajes de estireno que garanticen la impregnación total de las partículas de vidrio. Esto se realiza mediante examen visual, ya que al estar el

vidrio totalmente impregnado de estireno cambia su color y pasa de una tonalidad blanca a gris oscura.

Después de la impregnación, basta un tiempo prudencial de 5 a 10 minutos para que el estireno se haya secado completamente y el vidrio tratado se pueda utilizar para la preparación del mortero.

Se sugiere que el vidrio impregnado y estabilizado se utilice durante las siguientes 24 horas, ya que el proceso de polimerización tiende a pegar las partículas de vidrio estabilizado, el cual endurece y forma grumos, alterando la granulometría original y por consiguiente la textura, manejabilidad y uniformidad de la mezcla de mortero a preparar.

- **Procedimiento de impregnación**

Fotografía 34. Procedimiento de impregnación.



Después de muchas pruebas de ensayo y error, se logró obtener las proporciones más óptimas en la impregnación de las muestras de vidrio. Esto con base en el análisis visual (cambio de color y textura de la masa de vidrio) de las partículas.

Para cada granulometría se obtuvieron los siguientes resultados:

- **PARA ESTABILIZAR EL R-30**

Por cada kilo de R-30 se necesitan 28 gramos de mezcla de resina y estireno.

- **PARA ESTABILIZAR EL R-50**

Por cada kilo de R-50 se necesitan 32 gramos de mezcla de resina y estireno.

- **PARA ESTABILIZAR EL R-100**

Por cada kilo de R-100 se necesitan 49.16 gramos de mezcla de resina y estireno.

En las siguientes figuras se puede observar el vidrio antes de su adecuación y después de su adecuación:

Fotografías 35 y 36. Apariencia del vidrio sin estabilizar (izquierda) y del vidrio estabilizado (derecha).



- **Disponibilidad y adquisición del Estireno.**

El estireno, como ya se dijo, es de producción nacional y constituye también uno de los principales productos de exportación para el país. Las autorizaciones de exportación están sujetas a un mecanismo de consulta a fin de que se garantice el suministro adecuado de esta materia prima para el consumo nacional.

En el país son productoras de Estireno las siguientes compañías:

- Dow Colombia S.A.
- Productos químicos Esso, Inc.

- Monsato Colombia, Inc.
- Rochester laboratorios
- Shell Colombia S.A.
- Unión Carbide Colombia S.A.
- Química Holanda
- Andercol S.A.
- Fiberglass S.A.

En Bucaramanga, existen varias empresas distribuidoras de estos materiales como lo son:

- Comercializadora la Unión
- Representaciones Técnicas S.A.
- Kurtiplas

Tanto el Estireno, como la resina, el peroxido de MEK y las sales de Cobalto se adquirieron en Kurtiplas, donde se nos proporcionó la información técnica y las recomendaciones para la manipulación de estos productos.

- **Método químico para determinar la reactividad potencial del vidrio estabilizado con Estireno.**

Ya estabilizado el vidrio, se procede a realizar la prueba de reactividad alcalina para observar su comportamiento dentro de la pasta de mortero y garantizar o descartar su uso.

- **Reducción de la alcalinidad.**

A la solución que contiene la muestra se le añaden 3 gotas de fenolftaleína y se titula con una solución 0.05 N de HCL hasta el cambio del color de la fenolftaleína.

Se calcula la reducción en la alcalinidad como sigue:

$$R_c = (20 \cdot N / V_1) \cdot (V_3 - V_2) \cdot 1000 \text{ (milimoles por litro)}$$

Donde:

R_c = Reducción de la alcalinidad, milimoles por litro.

N = Normalidad de HCl usado para titular

V_1 = Mililitros de solución diluida en la muestra.

V_2 = Mililitros HCl usado para obtener el punto final de fenolftaleína en la muestra de ensayo.

V_3 = Mililitros HCl usado para alcanzar el punto final de fenolftaleína en solución de referencia.

DATOS: $N = 0.01$ $V_3 = 1.3 \text{ ml}$ $V_1 = 20 \text{ ml}$

CÁLCULO TIPO:

Muestra 1: $V_2 = 0.8$

$$R_c = (20 \cdot 0.01 / 20) \cdot (1.3 - 0.8) \cdot 1000 = 5$$

Se analizan tres muestras y los resultados fueron los siguientes:

Tabla 18. Datos Rc para el vidrio tratado.

MUESTRA	V ₂ (ml)	Rc (ml/l)
1	0.8	5
2	0.7	6
3	0.9	4

El promedio de los valores de Rc es 5 milimoles por litro.

- **Sílice disuelta.**

A la muestra de ensayo se le agrega HCl y se introduce al horno; el remanente sólido se lava nuevamente con HCl y se quema; a continuación se le añaden 10 ml de HF y una gota de H₂SO₄, se somete al calor hasta la sequedad y se pesa.

La concentración de SiO₂ en la solución de NaOH filtrada del agregado se calcula como sigue:

$$Sc = (W1-W2)*3330 \text{ (milimoles por litro)}$$

Donde:

Sc = Concentración de SiO₂ en milimoles por litro en el producto original.

W1 = Gramos de SiO₂ encontrados en mililitros de la solución diluida de la muestra.

W2 = Gramos de SiO₂ encontrados en la solución testigo.

DATOS:

$$W_2 = 0.046$$

Se obtuvo los siguientes resultados de las tres muestras analizadas.

Tabla 19. Datos Sc para el vidrio tratado.

MUESTRA	$W_1(\text{gr.})$	Sc(ml/l)
1	0.061	49.5
2	0.063	56.1
3	0.064	59.4

El promedio de los valores de Sc es 55 milimoles por litro.

Los resultados de los ensayos se consideran satisfactorios, si ninguno de los tres valores de Rc y Sc difieren del promedio de los tres en más de las siguientes cantidades:

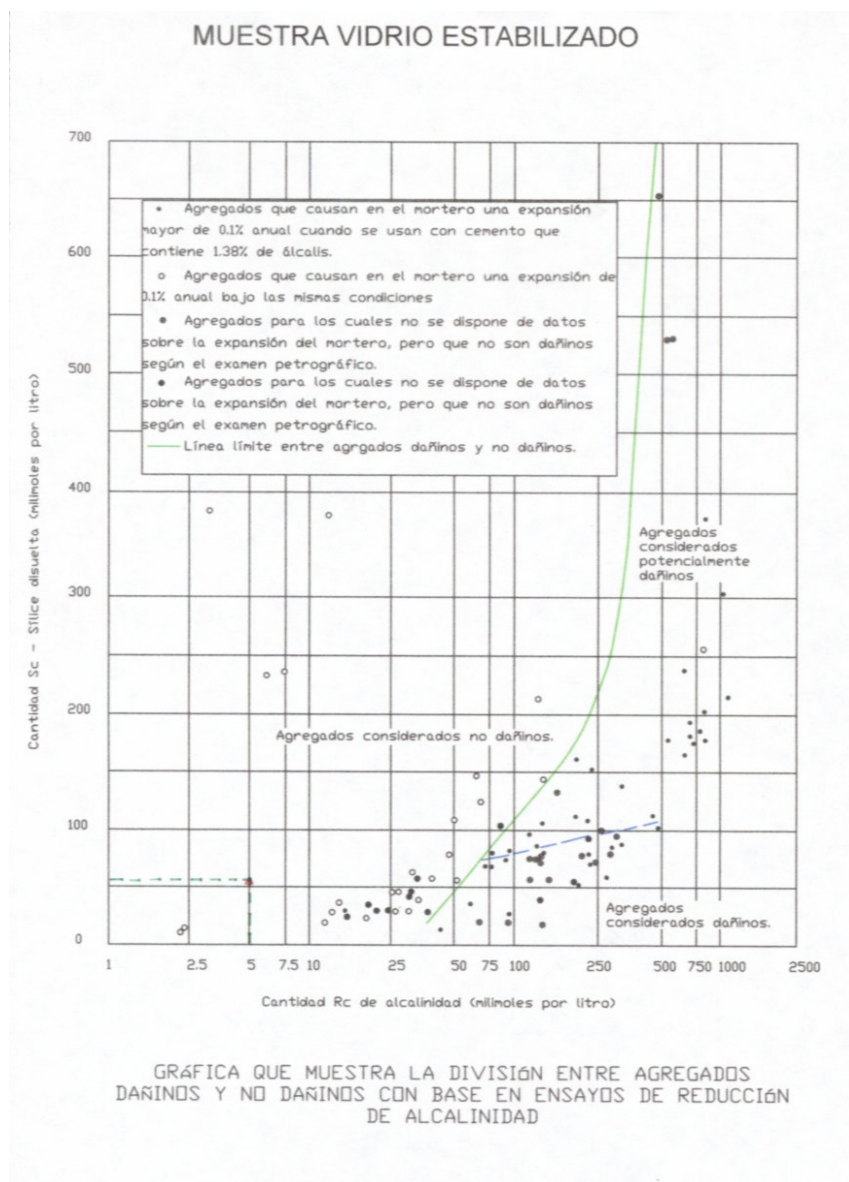
- Cuando el promedio es cien milimoles o menos, doce milimoles por litro.
- Cuando el promedio es cien milimoles por litro o mayor, 12%

Comparando $R_c = 5$ y $Sc = 55$ milimoles/litro con los resultados de las muestras, se puede considerar aceptables los datos.

▪ Análisis de resultados

Las muestras analizadas caen en la zona izquierda de la línea límite (en la gráfica 8), por lo tanto, en vidrio molido tratado se considera como agregado no dañino, logrando el objetivo de reducir la reactividad álcali-agregado.

Gráfica 8. Sílice Disuelta Vs. Reducción Alcalina para el Vidrio Tratado.



5 PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Ensayo de Compresión

Para el análisis de la resistencia a compresión en morteros con adiciones de vidrio, se fabricaron 6 probetas por cada tipo de muestra y para cada período de curado: 7, 14, y 28 días, para un total de 162 probetas ensayadas.

Los resultados de este ensayo se expresarán en unidades de esfuerzo (Kg/cm^2), calculándolos de la ecuación $\delta = F / A$, donde, δ es el esfuerzo en el mortero, F es la fuerza aplicada y A es el área de la probeta en estudio, 25 cm^2 , correspondiente a cubos de 5 cm de lado.

Las líneas de falla generadas en las probetas se presentan a través de planos inclinados respecto del eje de aplicación de la carga (eje y); esta inclinación se debe a la restricción de movimiento en el sentido perpendicular a la carga (eje x), en las placas de apoyo.

Fotografía 37. Moldes para compresión, flexión y tracción



Fotografías 38 y 39. Probetas en curado y probetas de compresión

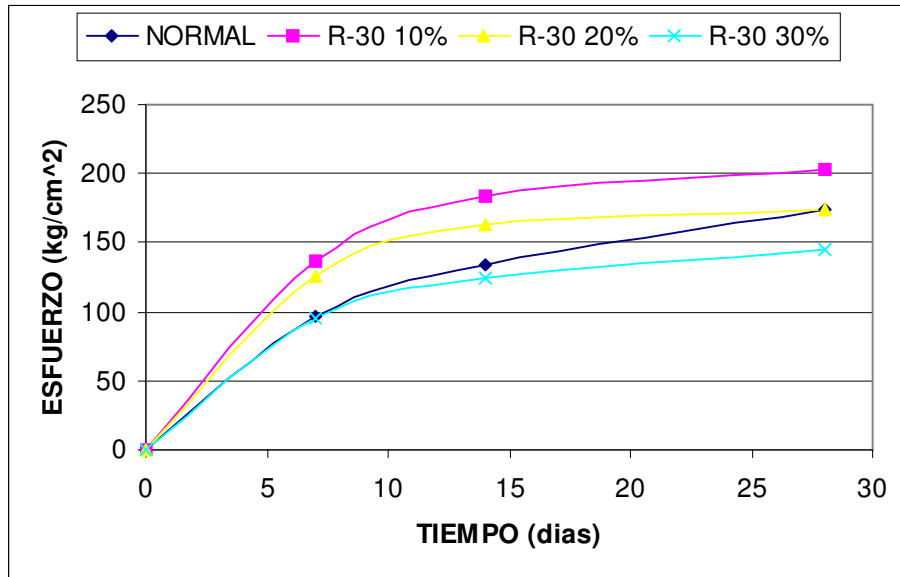


Fotografías 40 y 41. Probeta sometida a compresión y probeta fallada

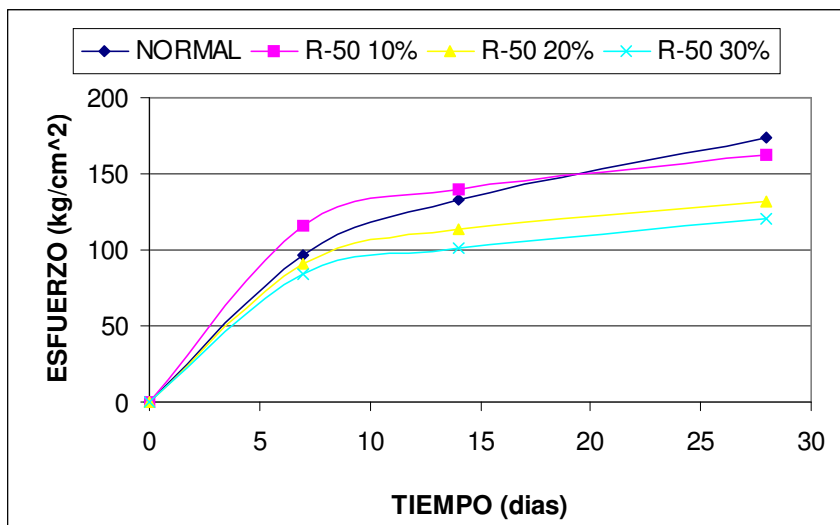


- Gráficas y análisis de resultados.

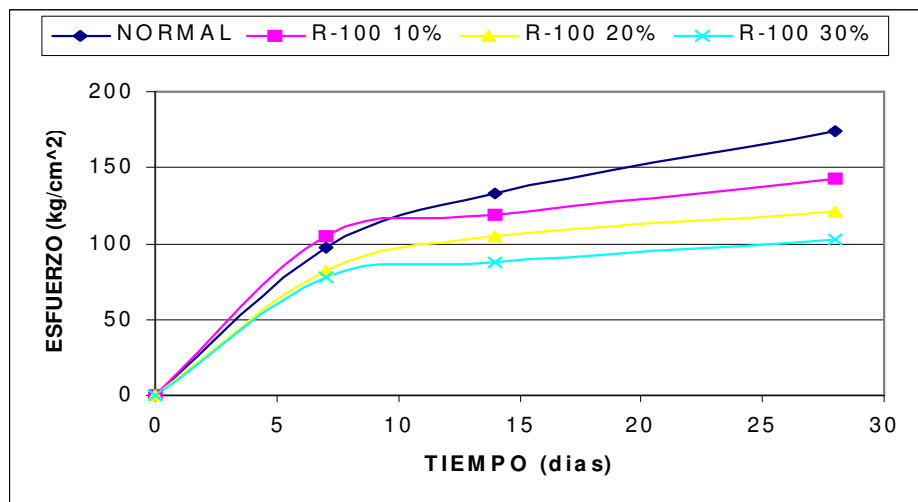
Gráfica 9. Resistencia a la Compresión vs. Tiempo para el Tamaño R30.



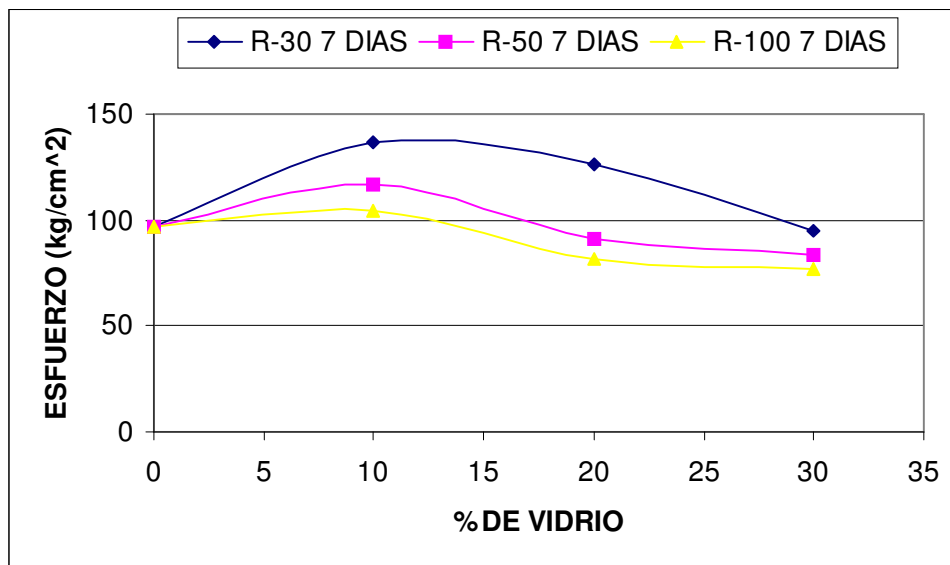
Gráfica 10. Resistencia a la Compresión vs. Tiempo para el Tamaño R50



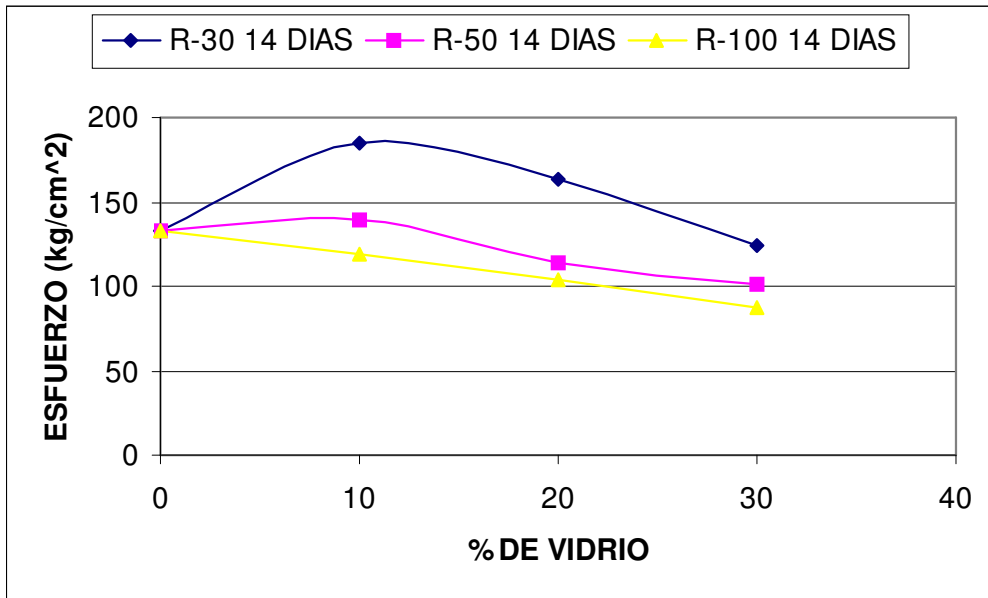
Gráfica 11. Resistencia a la Compresión vs. Tiempo para el Tamaño R100.



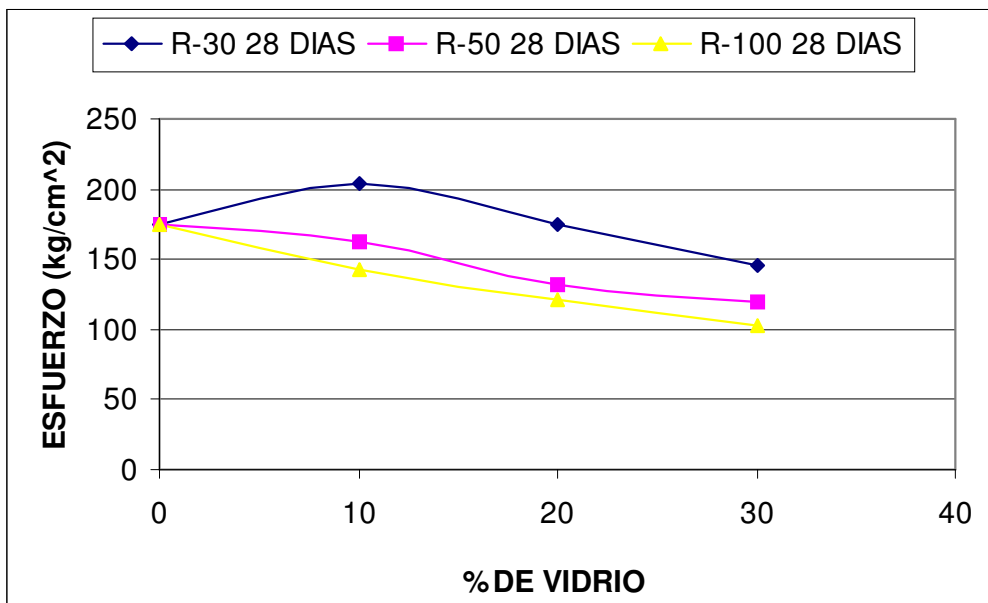
Gráfica 12. Resistencia a la Compresión vs. Contenido de Vidrio a los 7 días.



Gráfica 13. Resistencia a la Compresión vs. Contenido de Vidrio a los 14 días



Gráfica 14. Resistencia a la Compresión vs. Contenido de Vidrio a los 28 días

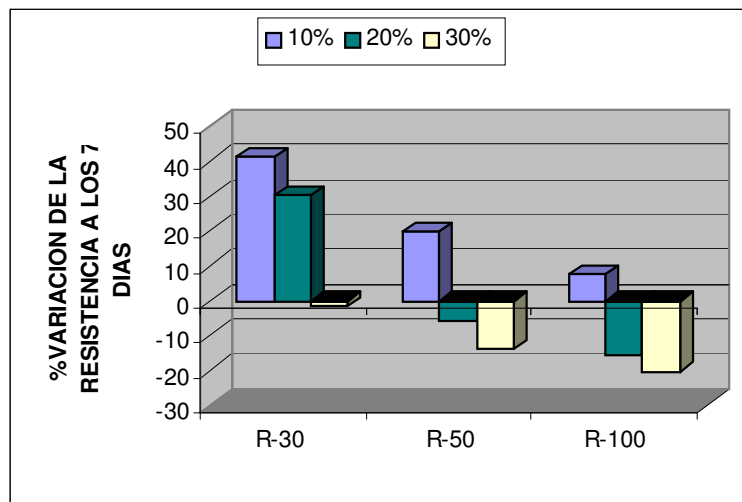


- **Análisis de Resultados**

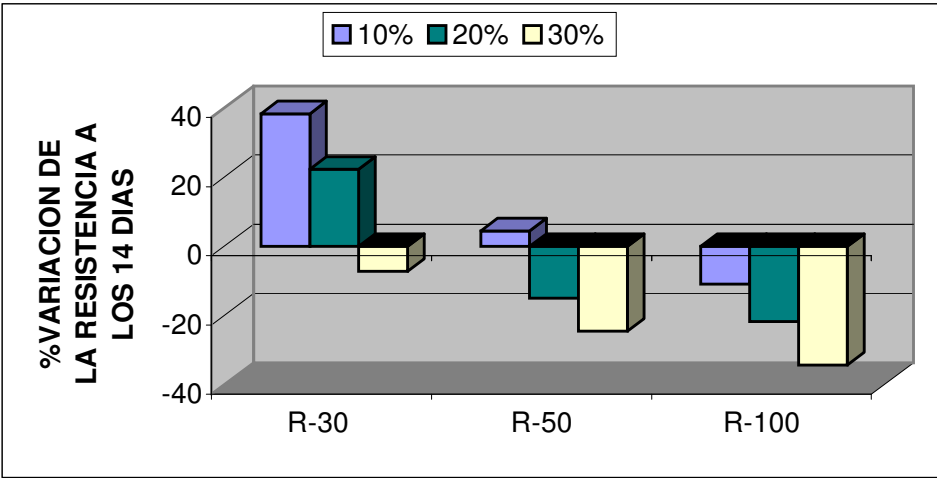
Analizando las graficas 9, 10 y 11, se puede concluir que a medida que aumenta el contenido de vidrio en las mezclas de morteros, disminuye el esfuerzo a la compresión, presentando la mayor resistencia las mezclas de mortero con adición de partículas de vidrio retenidas en el tamiz No.30. A partir de las graficas 12, 13 Y 14, se puede concluir que al aumentar el tamaño de las partículas de vidrio, aumenta el esfuerzo a la compresión.

El esfuerzo a la compresión para la mezcla de mortero normal, sin adición de vidrio, a los 28 días fue de 169,20 kg/cm²; para la mezcla de mortero R-30 10%, la cual presentó el mayor esfuerzo a compresión con respecto a los demás tipos de mortero fue de 203.67 kg/cm², representando un aumento de 16.83 % de la resistencia normal. En las graficas 15, 16 Y 17 se puede observar la variación de la resistencia a la compresión para los diferentes tipos de mortero con adiciones de vidrio con respecto al mortero normal.

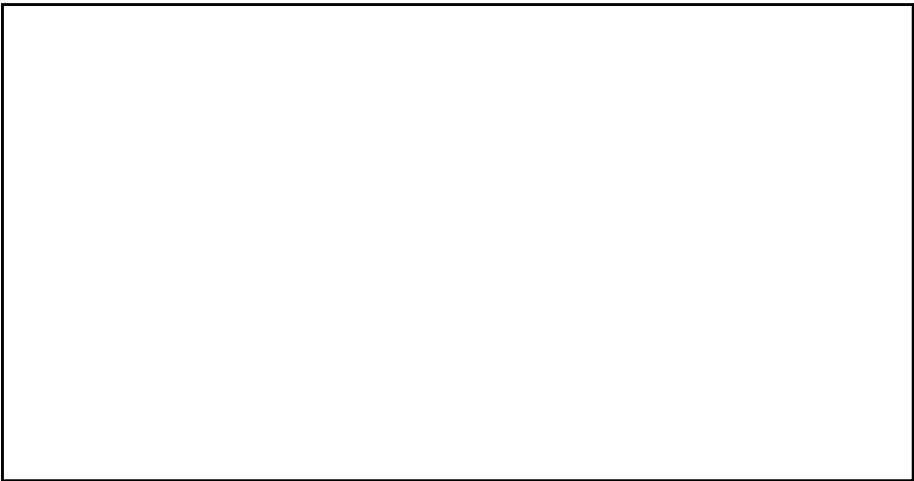
Gráfica 15. Variación de la Resistencia a la Compresión a los 7 días



Gráfica 16. Variación de la Resistencia a la Compresión a los 14 días



Gráfica 17. Variación de la Resistencia a la Compresión a los 28 días



5.2 Ensayo de Flexión.

Para el análisis de la resistencia a flexión en morteros con adiciones de vidrio se fabricaron 6 probetas por cada tipo de muestra y para un período de curado de: 7,14 y 28 días, para un total de 162 probetas ensayadas.

Los resultados de este ensayo se expresarán en unidades de esfuerzo (Kg/ cm^2); el valor de resistencia responde al comportamiento de una viga simplemente apoyada con una carga central y se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\delta = (3 * F * L) / (2 * a^3)$$

donde: δ : Resistencia a flexión (Kg/ cm^2)

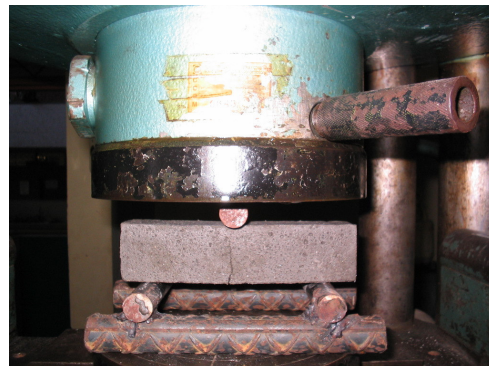
F: Fuerza aplicada al sistema (Kg)

L: Longitud Efectiva entre apoyos (12 cm)

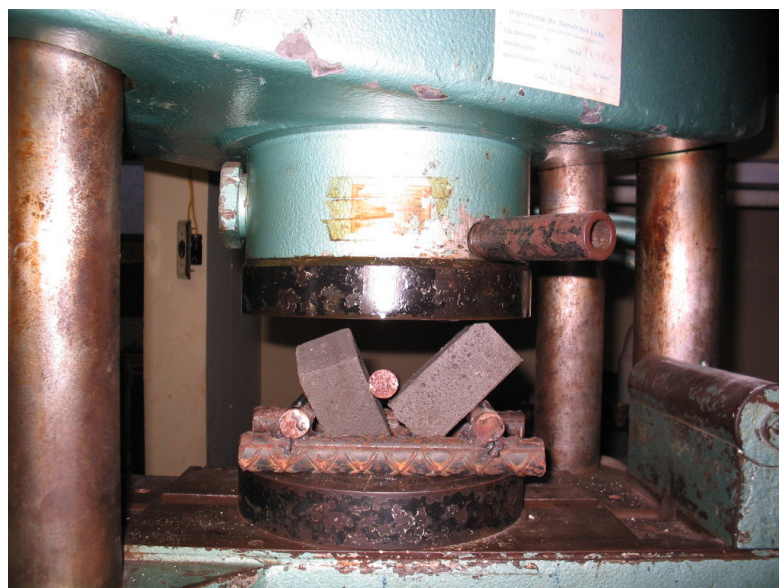
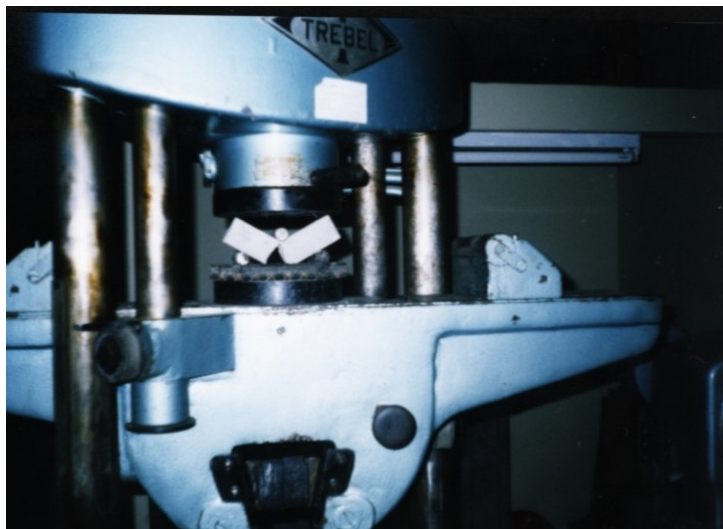
a: Longitud del lado de sección transversal de la viga (3.555 cm)

La falla de este elemento se realiza por el momento, al que se somete la sección transversal del elemento generándose tracción en las fibras exteriores y opuestas a la aplicación de la carga, y su posterior rompimiento siguiendo la línea de falla que se muestra. Ver Fotografías 42, 43, 44 Y 45.

Fotografías 42 y 43. Ensayo de las probetas a flexión.

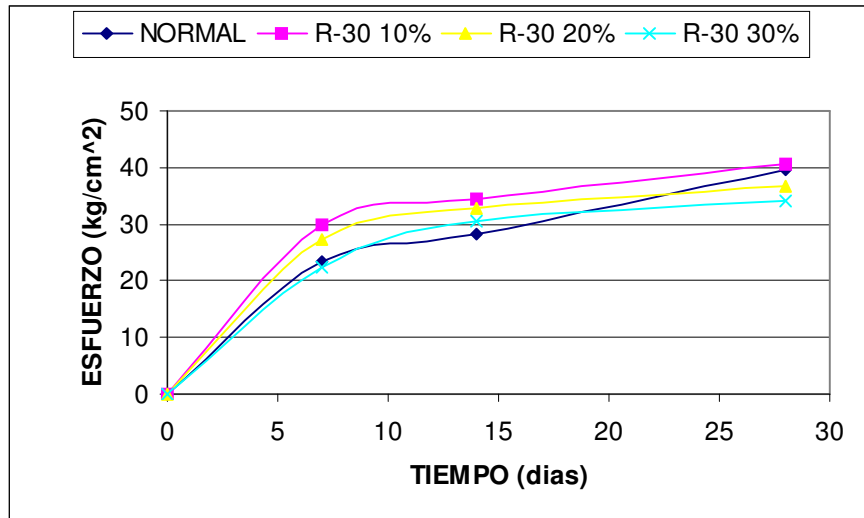


Fotografías 44 y 45. Las probetas completamente falladas

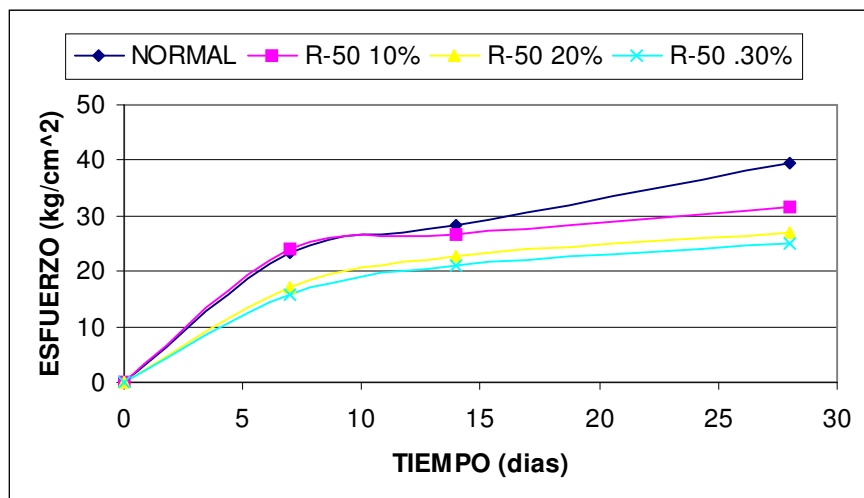


- Gráficas y análisis de resultados.

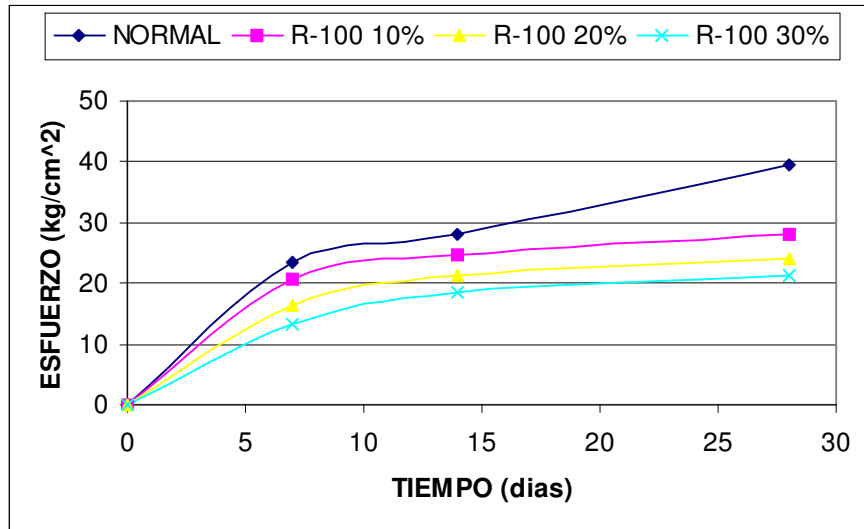
Gráfica 18. Resistencia a la Flexión vs. Tiempo para el Tamaño R30.



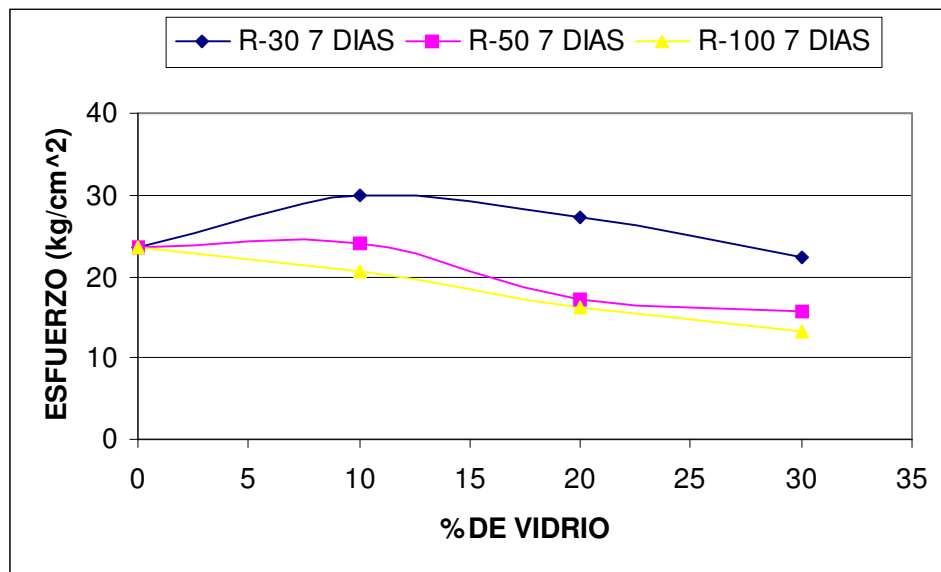
Gráfica 19. Resistencia a la Flexión vs. Tiempo para el Tamaño R50.



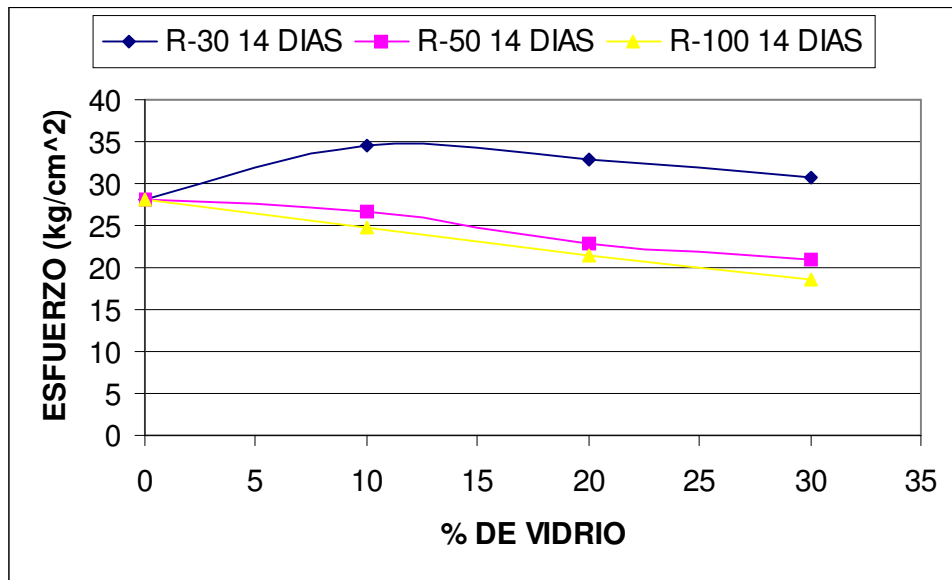
Gráfica 20. Resistencia a la Flexión vs. Tiempo para el Tamaño R100.



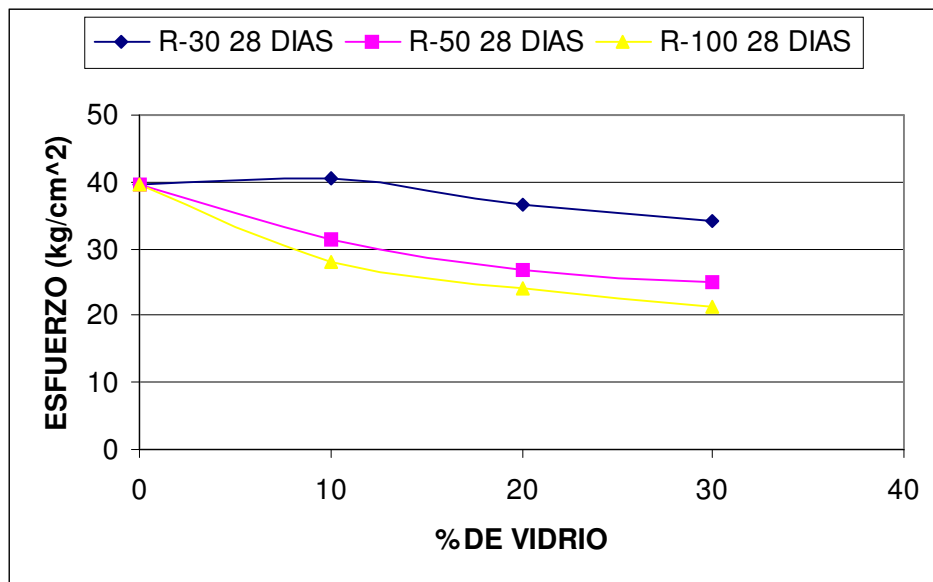
Gráfica 21. Resistencia a la Flexión vs. Contenido de Vidrio a los 7 días.



Gráfica 22. Resistencia a la Flexión vs. Contenido de Vidrio a los 14 días.



Gráfica 23. Resistencia a la Flexión vs. Contenido de Vidrio a los 28 días.

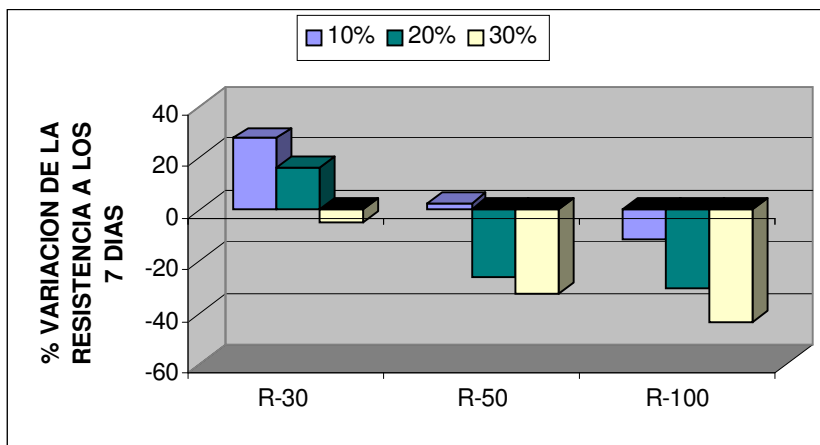


Análisis de Resultados

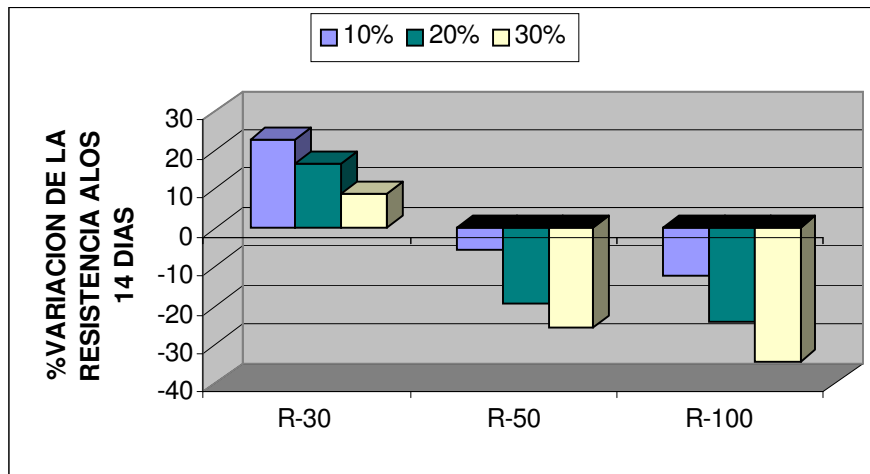
Analizando las graficas 18, 19 y 20 se puede observar que a medida que aumenta el contenido de vidrio en las mezclas de morteros, disminuye el esfuerzo a la flexión, presentando la mayor resistencia las mezclas de mortero con adición de partículas de vidrio retenidas en el tamiz No.30, al igual que en las pruebas de compresión. Analizando las graficas 21, 22, 23, al aumentar el tamaño de las partículas de vidrio, aumenta el esfuerzo a la flexión.

El esfuerzo a la flexión para la mezcla de mortero normal a los 28 días fue de 39.62 kg/cm²; para la mezcla de mortero R-30 10%, la cual presentó el mayor esfuerzo a flexión con respecto a los demás tipos de mortero, fue de 40.55 kg/cm², representando un aumento del 2.35 % de la resistencia normal. En las graficas 24, 25 y 26 se puede observar la variación de la resistencia a la flexión para los diferentes tipos de mortero con adiciones de vidrio con respecto al mortero normal.

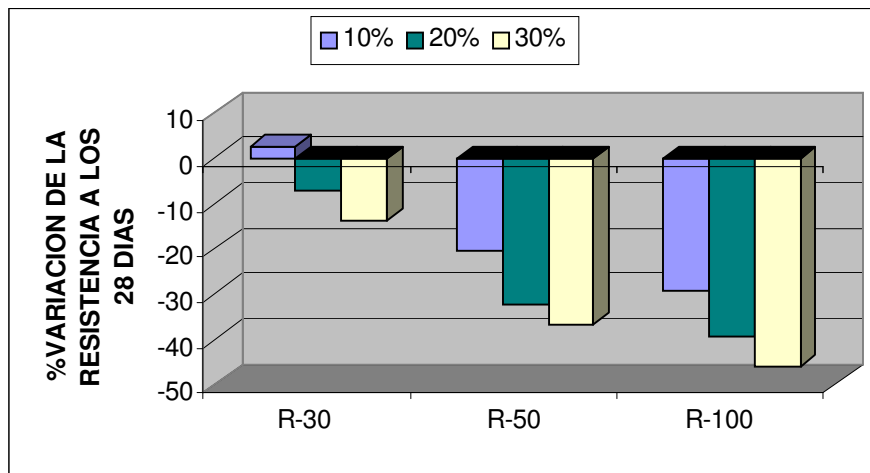
Gráfica 24. Variación de la Resistencia a la Flexión a los 7 días.



Gráfica 25. Variación de la Resistencia a la Flexión a los 14 días.



Gráfica 26. Variación de la Resistencia a la Flexión a los 28 días.



5.3 Ensayo de Tracción.

Para el análisis de la resistencia a tracción en morteros con adiciones de vidrio se fabricaron 6 probetas por cada tipo de muestra y para cada período de curado: 7, 14 y 28 días, para un total de 162 probetas ensayadas.

Los resultados de este ensayo se expresarán en unidades de esfuerzo (Kg./ cm^2), calculándolos de la ecuación $\delta = F / A$, donde, δ es el esfuerzo en el mortero, F es la fuerza aplicada y A es el área de la sección transversal de la probeta en estudio, 6.25 cm^2 .

El tipo de falla generado es característico de un sistema sometido a esfuerzos de tracción, donde se presenta una línea de falla perpendicular a la línea de aplicación de la carga ver Fotografías 46, 47, 48 y 49.

Fotografías 46 y 47. Ensayo de las probetas de tracción

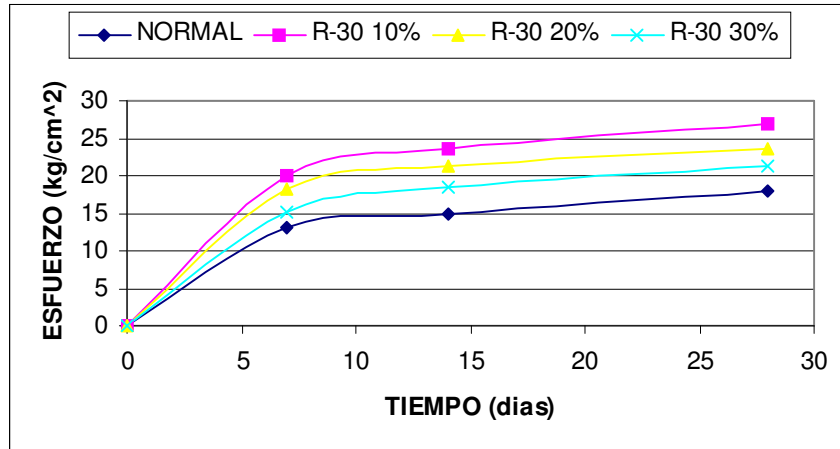


Fotografías 48 y 49. Detalle de las probetas del ensayo de tracción

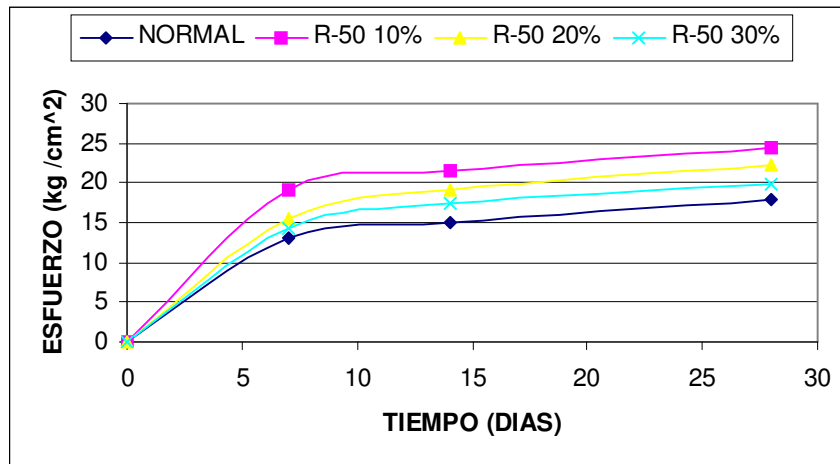


- Gráficas y análisis de resultados.

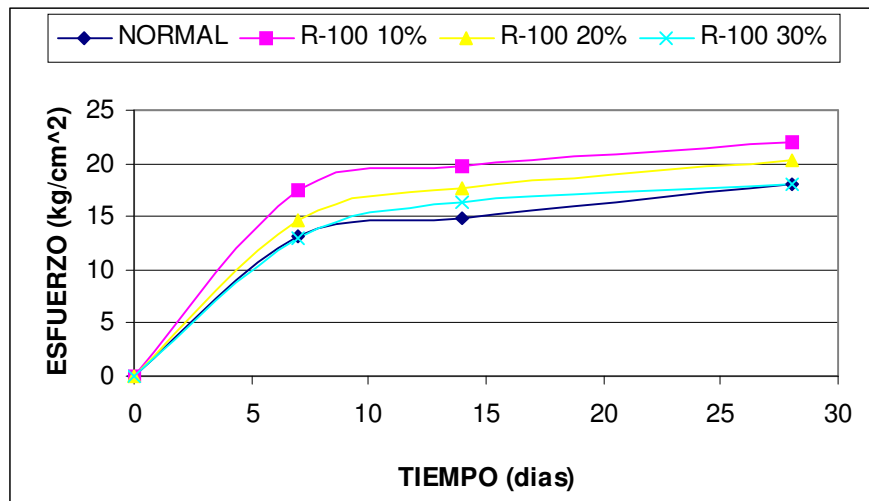
Gráfica 27. Resistencia a la Tracción vs. Tiempo para el Tamaño R30.



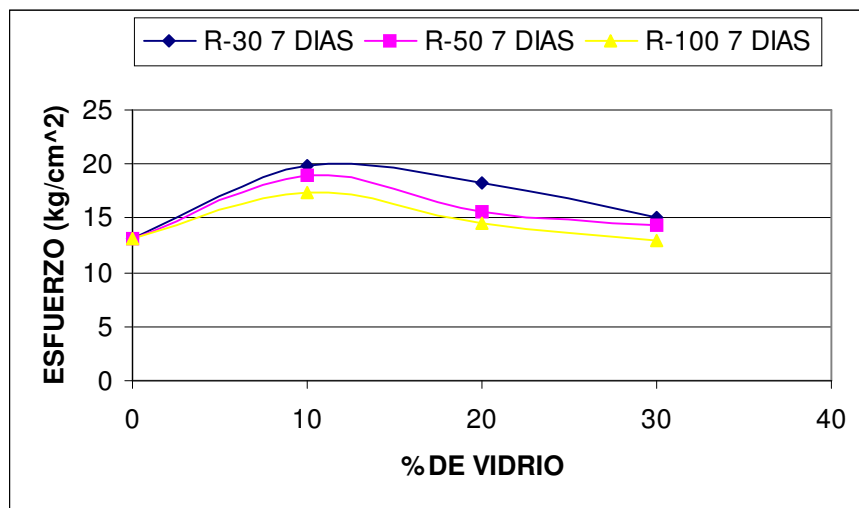
Gráfica 28. Resistencia a la Tracción vs. Tiempo para el Tamaño R50.



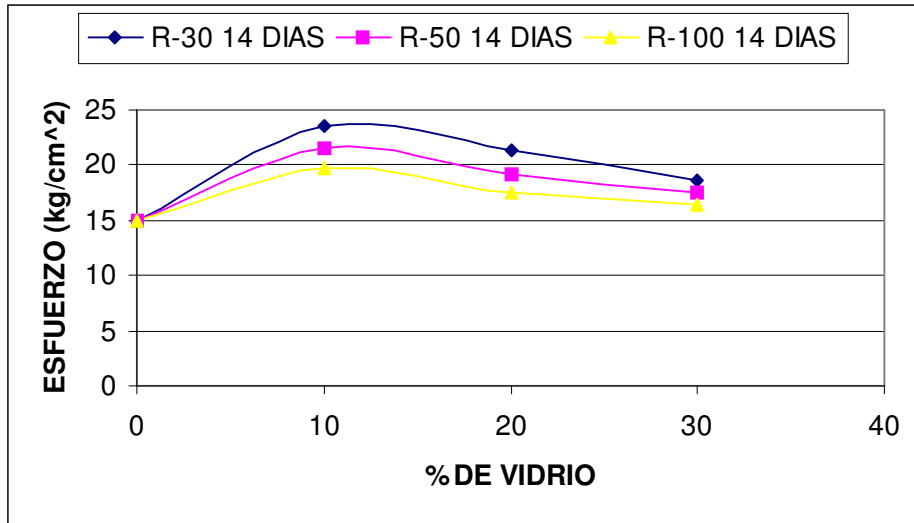
Gráfica 29. Resistencia a la Tracción vs. Tiempo para el Tamaño R100.



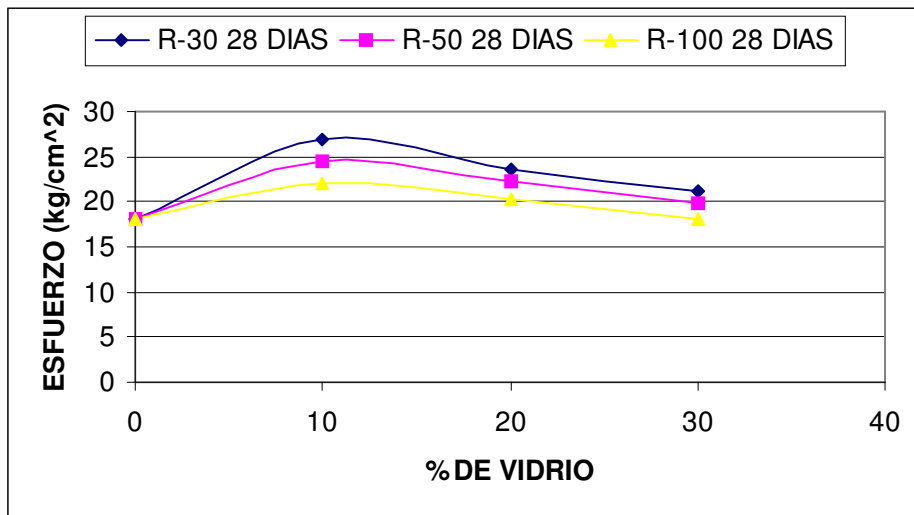
Gráfica 30. Resistencia a la Tracción vs. Contenido de Vidrio a los 7 días.



Gráfica 31. Resistencia a la Tracción vs. Contenido de Vidrio a los 14 días.



Gráfica 32. Resistencia a la Tracción vs. Contenido de Vidrio a los 28 días.

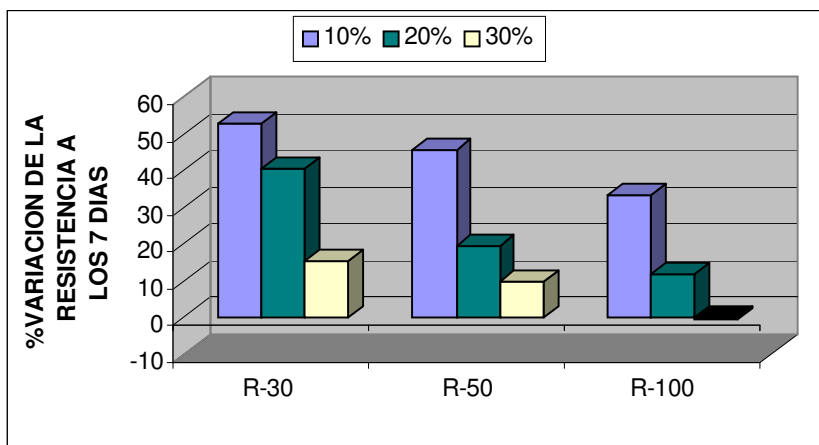


Análisis de Resultados

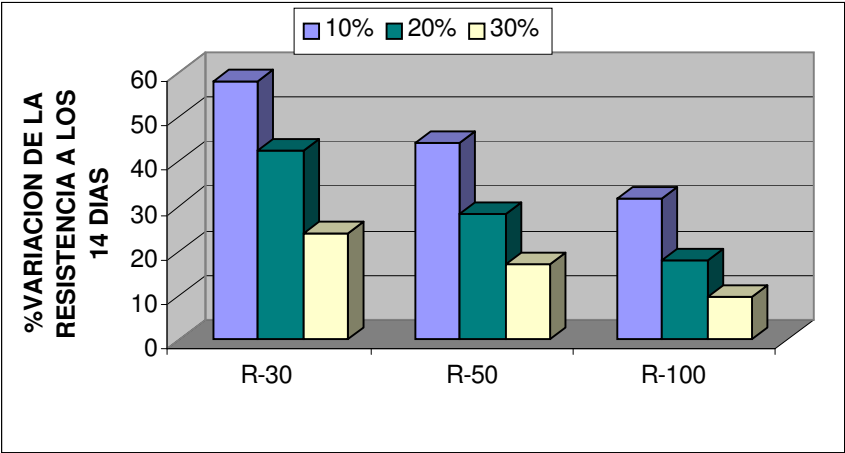
Analizando las gráficas 27, 28 y 29 se puede concluir que a medida que aumenta el contenido de vidrio en las mezclas de morteros, disminuye el esfuerzo a la tracción, presentando la mayor resistencia las mezclas de mortero con adición de partículas de vidrio retenidas en el tamiz No.30. A partir de las graficas 30, 31 y 32 se puede concluir que al aumentar el tamaño de las partículas de vidrio, aumenta el esfuerzo a la tracción, siendo en todos los casos superior al mortero normal. Este comportamiento se puede explicar, debido a que las partículas tienden a ser granos, que logran reforzar el plano de falla del material.

El esfuerzo a la tracción para la mezcla de mortero normal, sin adición de vidrio, a los 28 días fue de 18.02 kg/cm^2 ; para la mezcla de mortero R-30 10%, la cual presentó el mayor esfuerzo a tracción con respecto a los demás tipos de mortero, fue de 26.93 kg/cm^2 , representando un incremento de 49.61% de la resistencia normal. En las graficas 33, 34 y 35 se puede observar la disminución de la resistencia a la compresión para los diferentes tipos de mortero con adiciones de vidrio con respecto al mortero normal.

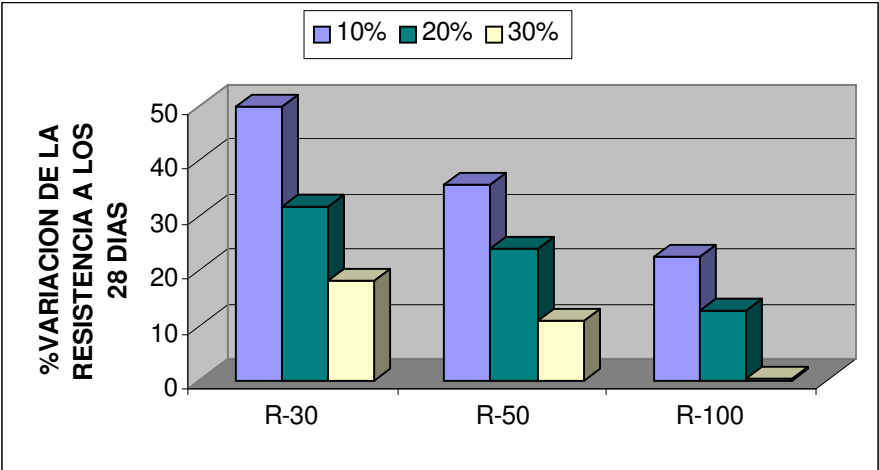
Gráfica 33. Variación de la Resistencia a la Tracción a los 7 días.



Gráfica 34. Variación de la Resistencia a la Tracción a los 14 días.



Gráfica 35. Variación de la Resistencia a la Tracción a los 28 días.



5.4 Ensayo de porosidad.

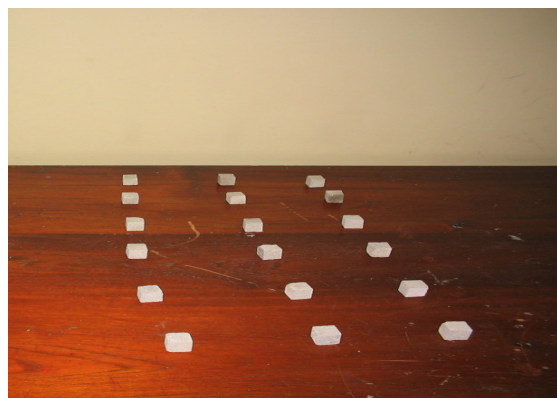
El Porosímetro de campo Ruska mide volúmenes del desplazamiento del pistón que corresponden al volumen de sólidos o granos de la muestra, y el volumen total de la muestra; posteriormente, estas medidas son convertidas a cm^3 usando curvas de calibración.

Después de convertir las lecturas de R_{core} y R_{Hg} a cm^3 , aplicamos la siguiente fórmula para calcular el porcentaje de porosidad de cada muestra:

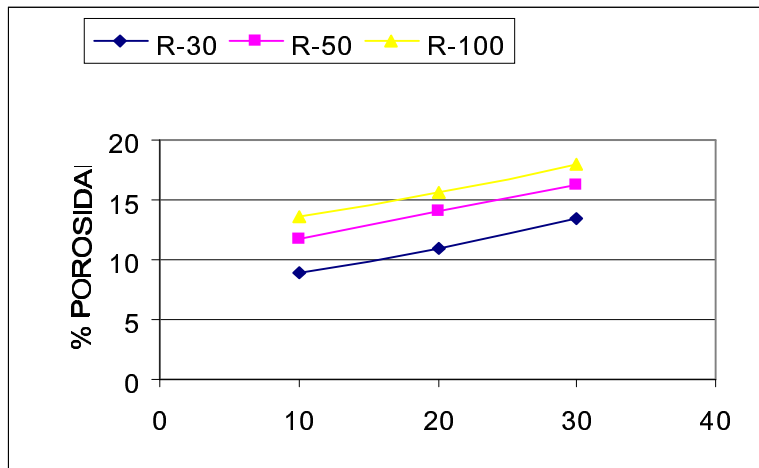
$$\text{Porosidad (\%)} = (1 - (R_{\text{core}} / R_{\text{Hg}})) * 100$$

En los Anexos tablas del 31 al 40 se ilustran los valores obtenidos por los diferentes tipos de morteros sometidos a los ensayos de porosidad utilizando el Porosímetro de campo Ruska. Se trazaron los gráficos las graficas 36 y 37 para analizar el comportamiento de las mezclas ante este fenómeno.

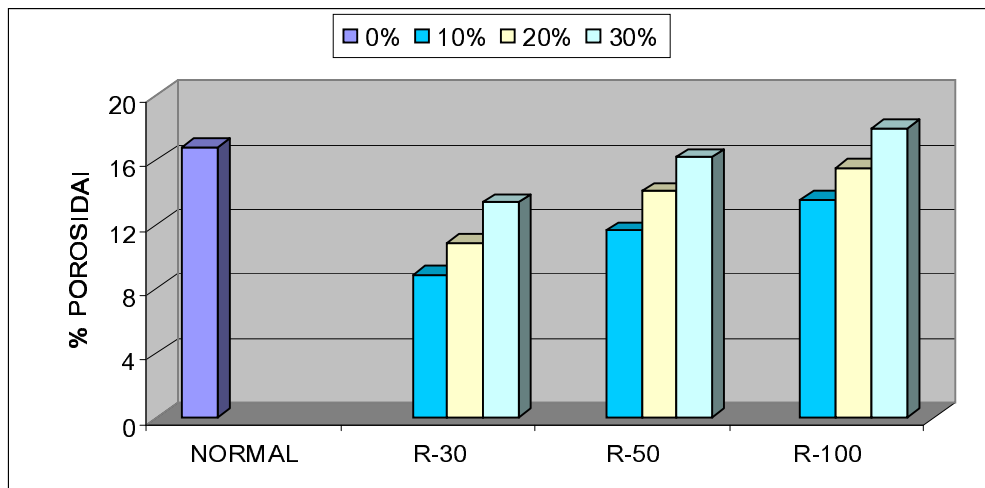
Fotografías 50 y 51. Porosímetro de campo Ruska y probetas de porosidad.



Grafica 36. Valores de Porosidad vs. Contenido de Vidrio



Grafica 37. Valores de Porosidad para cada uno de los Tipos de Mortero

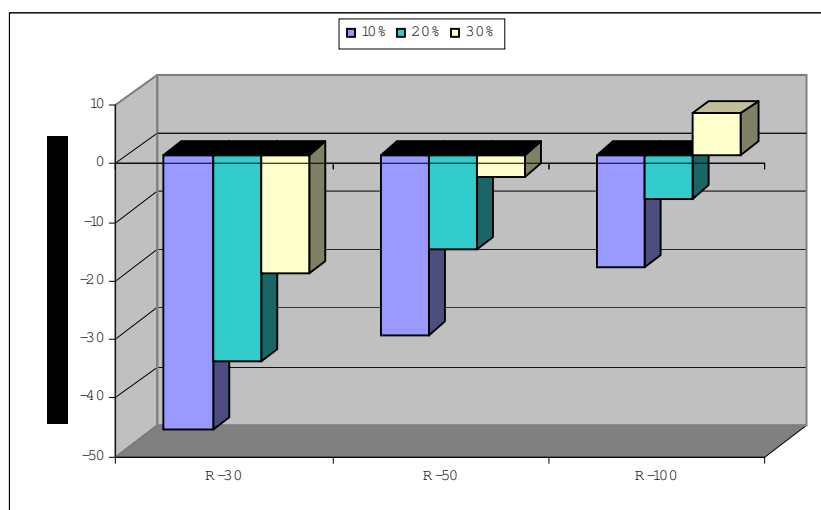


Análisis de Resultados.

Al analizar las graficas 36 y 37 se puede concluir que a medida que aumenta el contenido de vidrio en las mezclas de morteros, aumenta la porosidad, debido a que las partículas no logran distribuirse adecuadamente dentro de la matriz de mortero. También, al disminuir el tamaño de las partículas de vidrio y aumentar su proporción, disminuye la fluidez y éstas por no tener una distribución uniforme, no permiten eliminar los poros naturales de la mezcla en la estructura interna de la matriz del mortero.

El porcentaje de porosidad para la mezcla de mortero normal fue de 16.82%, y para la mezcla de mortero R-30 10%, la cual presentó el menor grado de porosidad con respecto a los demás tipos de mortero que fue de 8.91%, representando una disminución de 47.02%. En la grafica 38 se puede observar la disminución de la porosidad para los diferentes tipos de mortero con adiciones de vidrio con respecto al mortero normal.

Gráfica 38. Porcentaje de Variación de la Porosidad



5.5 Ensayo de Permeabilidad.

La permeabilidad obtenida mediante el Permeámetro de gas Ruska se calculó utilizando el caudal de gas que pasa a través del núcleo, el gradiente de presión, la viscosidad del gas y las dimensiones de la probeta.

La viscosidad del gas (μ) se obtiene a partir de la temperatura ambiente al momento de analizar la muestra. Con las lecturas flowmeter, R_f , y la escala de flowmeter (S, M, o L) se obtienen los datos de la Tasa promedio de flujo, Q (cm/seg), mediante gráficos de conversión; estos valores y junto con los datos de gradiente de presión P (atm), área de la sección transversal de la muestra, A (cm²), y longitud de la muestra, L (cm), se procede a hallar la permeabilidad (milidarcys) utilizando la siguiente expresión:

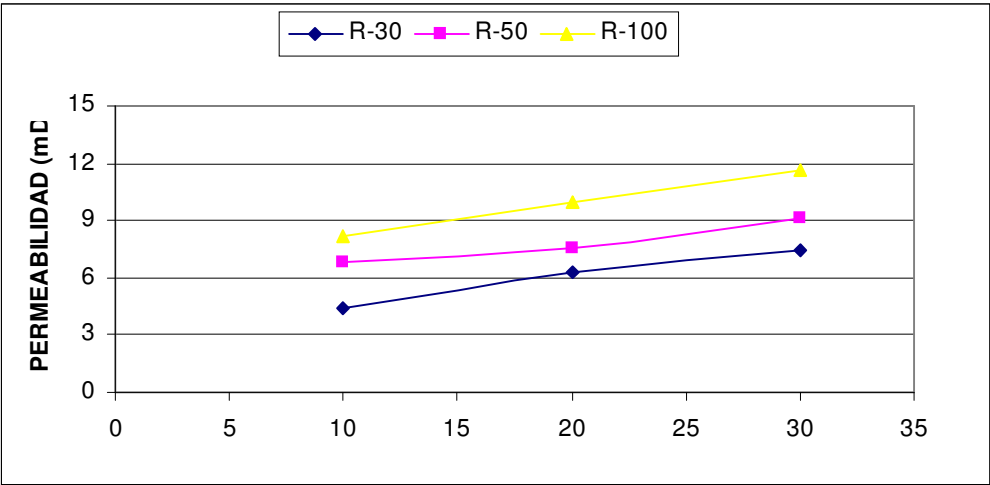
$$K = \frac{\mu \times Q \times L}{A \times P} \text{ (mD)}$$

Los Anexos tablas 41 al 50 y las gráficas 39 y 40 ilustran el comportamiento de los diferentes tipos de morteros sometidos a los ensayos de permeabilidad utilizando el Permeámetro Ruska.

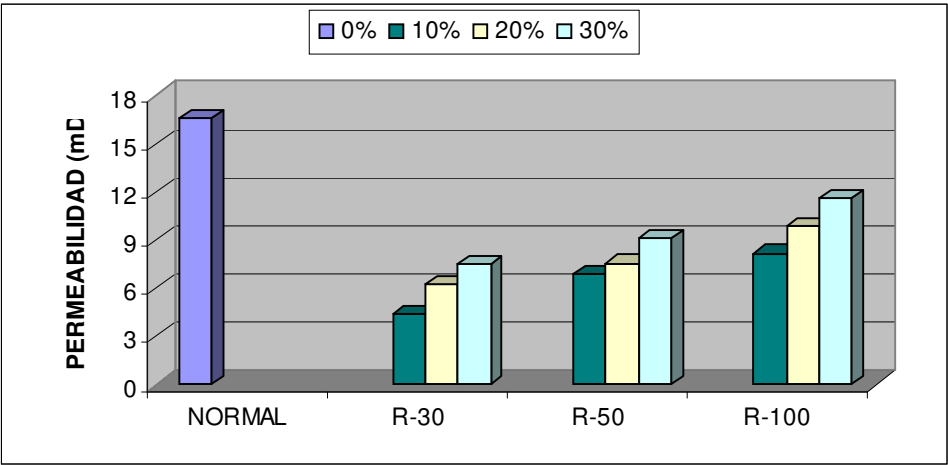
Fotografías 52 y 53. Permeámetro de campo Ruska y ensayos de laboratorio



Gráfica 39. Valores de Permeabilidad vs. Contenido de Vidrio



Grafica 40. Valores de Permeabilidad para cada uno de los Tipos de Mortero



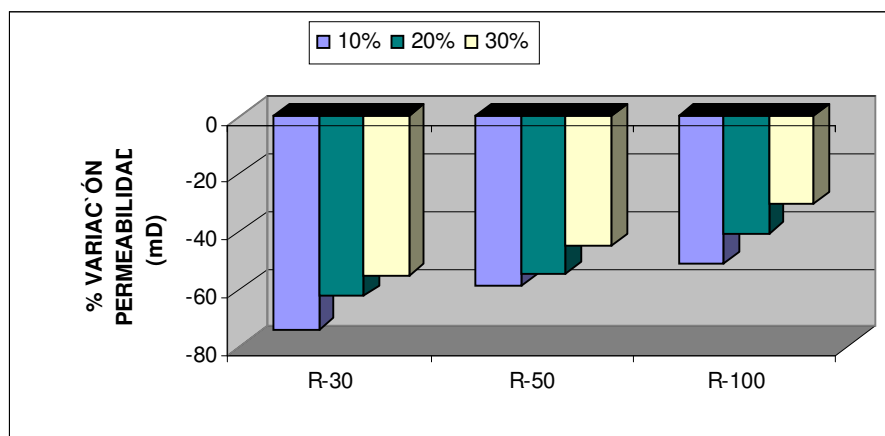
Análisis de Resultados.

Al analizar las graficas 39 y 40, se encontró que de manera similar como en los ensayos de porosidad, a medida que aumenta el contenido de vidrio en las mezclas de morteros aumenta la permeabilidad, ya que el paso de fluidos a través del material es función de la porosidad total del mismo; además del diámetro de los poros, su distribución y su continuidad.

Se pudo apreciar que al disminuir el tamaño del vidrio el material se hace más permeable. Este comportamiento es debido a que al disminuir el tamaño de las partículas de vidrio y aumentar su proporción, disminuye la fluidez y éstas al no ser uniformes impiden eliminar los poros naturales de la mezcla en la estructura de la matriz del mortero ocasionando mayor permeabilidad.

El porcentaje de permeabilidad para la mezcla de mortero normal fue de 16.65 mD, y para la mezcla de mortero R-30 10%, la cual presentó el menor grado de permeabilidad con respecto a los demás tipos de mortero que fue de 4.37 mD, representando una disminución de 73.75%. En la gráfica 41 se puede observar la disminución de permeabilidad para los diferentes tipos de mortero con adiciones de vidrio con respecto al mortero normal.

Gráfica 41. Porcentaje de Variación de la Permeabilidad



5.6 ENSAYO DE ABSORCIÓN CAPILAR.

Este ensayo permite interpretar el proceso de absorción de agua por los poros capilares del mortero a través del tiempo, analizando diversos parámetros como la resistencia a la penetración del agua, el coeficiente de absorción capilar y la porosidad efectiva.

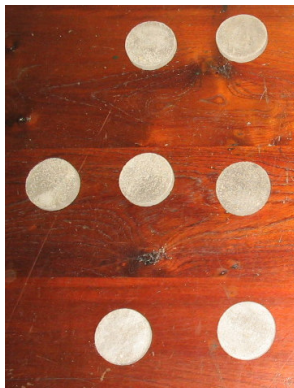
Para el análisis de los resultados, se trazaron las gráficas 42, 43 y 44, a partir de los datos de peso de agua absorbida por unidad de área de cada muestra (44.8717 cm²) respecto a la raíz del tiempo. En éstas se pudieron apreciar dos fases: la fase 1, que corresponde al avance del frente de absorción representado por el llenado de los poros capilares y la fase 2, que corresponde a la saturación; es decir, una vez que los poros capilares se han llenado, la saturación está relacionada con los poros de aire o burbujas producidos durante el amasado o por mala compactación, en la mayoría de los casos.

A partir de las gráficas descritas, se obtuvo la intercepción de las líneas correspondientes a cada fase, que representa el tiempo t_n , al cual el frente de agua ha alcanzado la cara superior de la probeta. Posteriormente, se calcularon la Resistencia a la penetración del agua (m), el coeficiente de absorción capilar (k), dado por la pendiente en la fase 1; la porosidad (ϵ) y la absortividad (S). Los resultados obtenidos se presentan en los Anexos tablas 51 y 52 y en las gráficas 45, 46, 47 y 48.

$$m = \frac{t_n}{H^2} \quad (\text{s} / \text{m}^2)$$

donde : H , corresponde al espesor de la probeta.

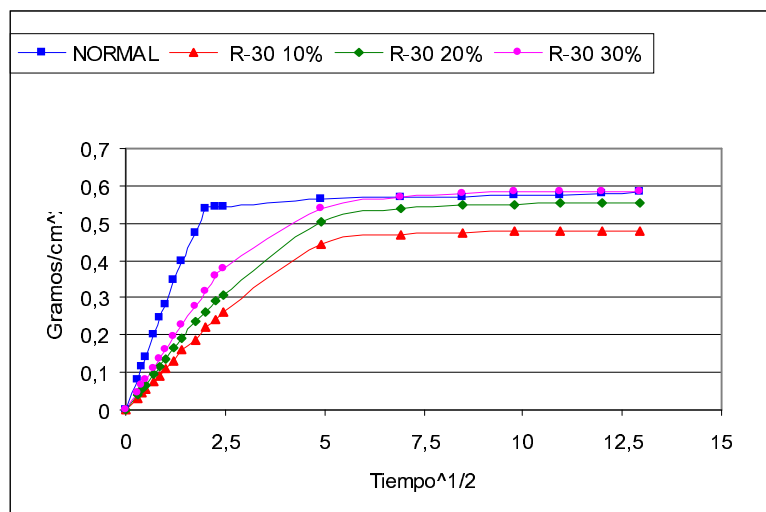
Fotografía 54. Probetas ensayo de absorción capilar



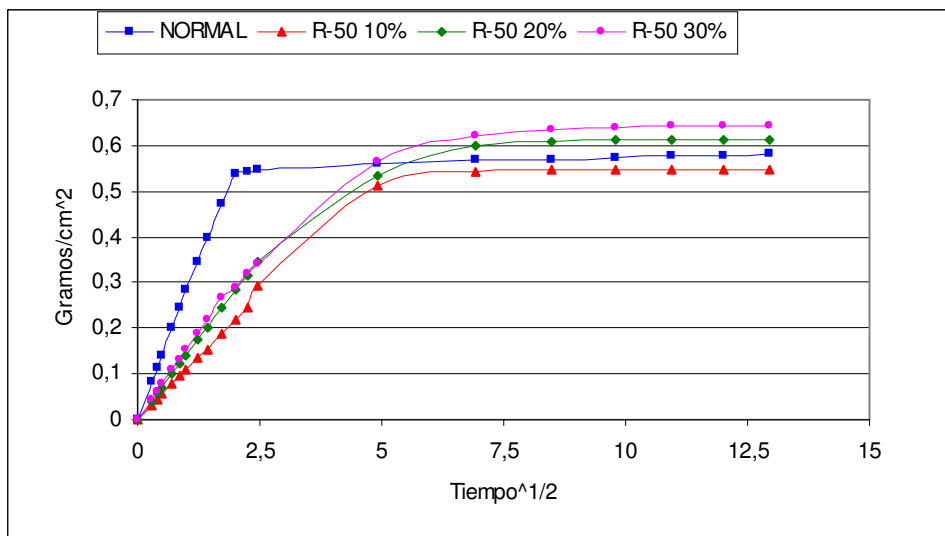
Fotografías 55 y 56. Montaje del ensayo de absorción capilar



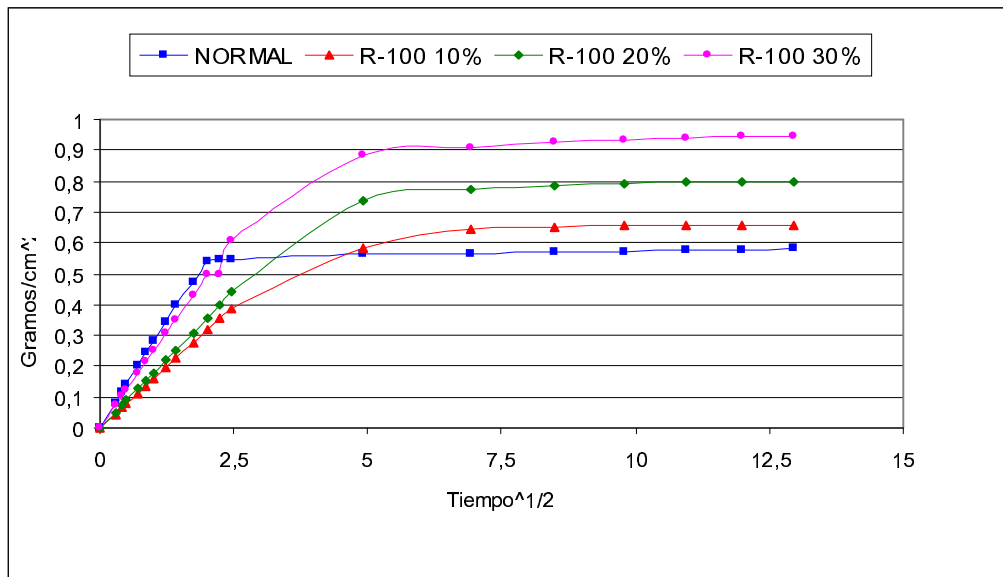
Gráfica 42. Absorción Capilar por unidad de área vs. Tiempo para Tamaño R30



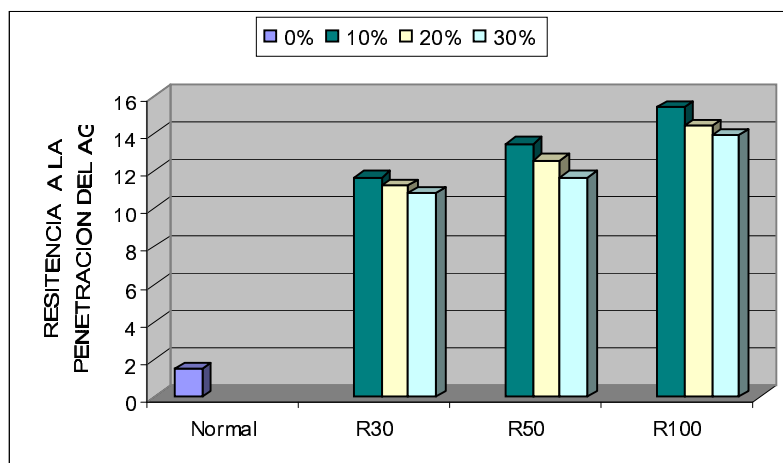
Gráfica 43. Absorción Capilar por unidad de área vs. Tiempo para Tamaño R50



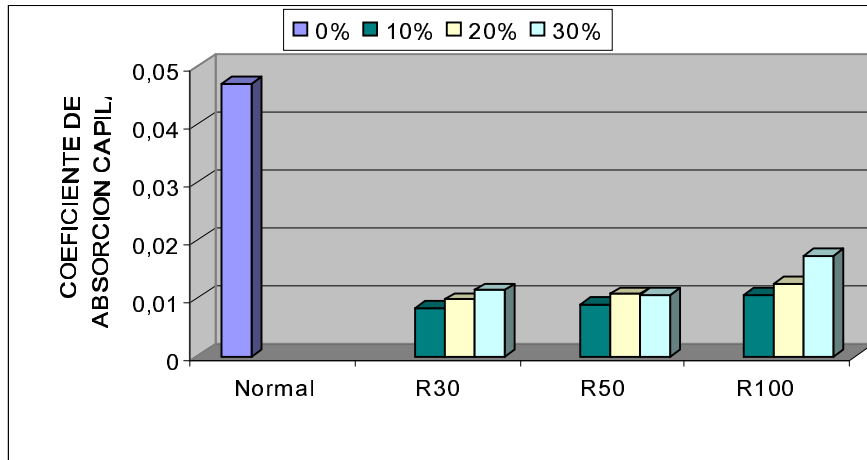
Gráfica 44. Absorción Capilar por unidad de área vs. Tiempo para Tamaño R100



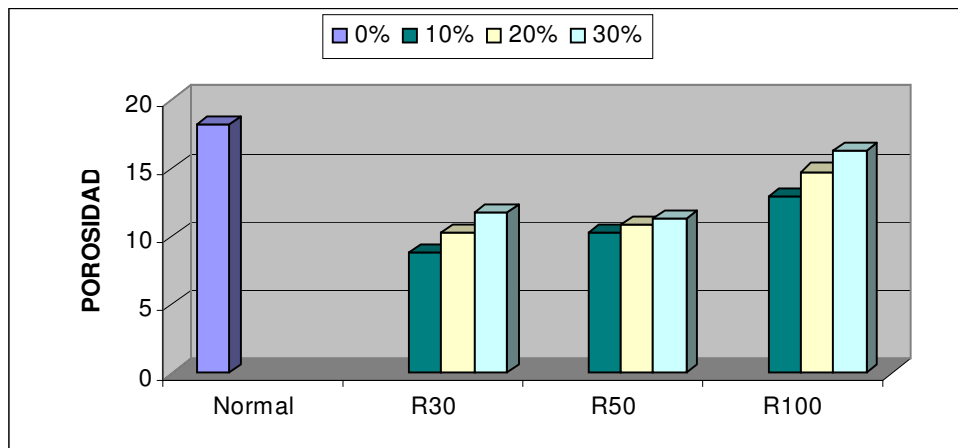
Gráfica 45. Valores de Resistencia a la Penetración del Agua (m) de cada Tipo de Mortero



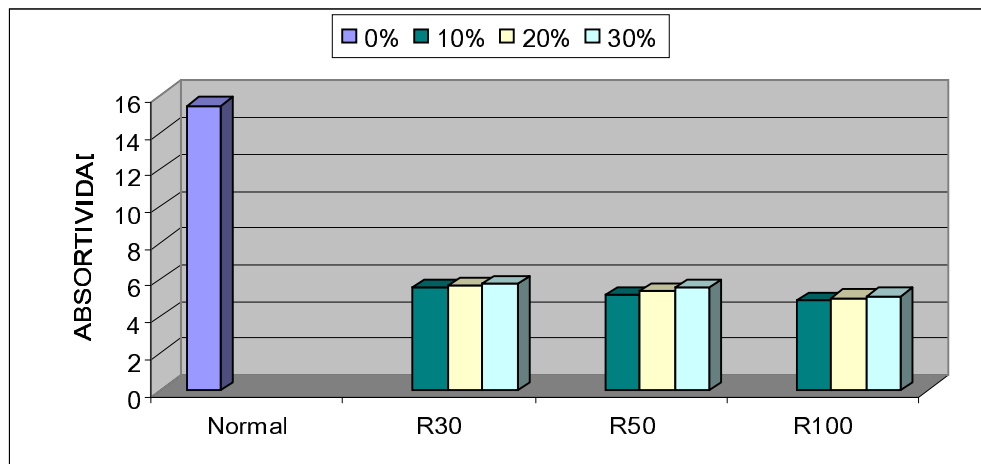
Gráfica 46. Valores del Coeficiente de Absorción Capilar (k) de cada Tipo de Mortero



Gráfica 47. Valores de Porcentaje de Porosidad (ϵ) de cada Tipo de Mortero



Gráfica 48. Valores de Absortividad (S) de cada Tipo de Mortero



Análisis de Resultados.

Al analizar las graficas 45, 46, 47 y 48; y teniendo en consideración que el mejor comportamiento corresponde a aquel material cuya resistencia a la penetración del agua sea elevada (m), siendo la normal de 1.505 y las de los morteros: R-30 10% de 11.664, R-50 10% de 13.456 y la del R-100 10% de 15.376 $m(10^7)$. Su coeficiente de absorción k relativamente bajo para el mortero normal de 0.047 y el mortero R-30 10% de 0.008, con una disminución del 74.46%. Su porosidad reducida (ϵ), y Absortividad menor (S) con un valor de 15.464 para el mortero normal y para los morteros R-30 10% de 5.556, R-50 10% de 5.172 y para R-100 10% de 4.839. Además se puede decir que:

Para todos los tamaños el mejor desempeño corresponde para los morteros con el 10 % de vidrio. Corroborando los resultados de los ensayos de porosidad y permeabilidad realizados anteriormente con los equipos Ruska.

Teniendo en cuenta los resultados de porosidad (Ensayo de Absorción capilar y Ensayo de Porosidad Porosímetro de Campo Ruska) se concluye que:

El grado de confiabilidad de los resultados de porosidad es elevado, ya que se encuentran en el mismo rango, 18.15% para el mortero normal y 8.80 % para el R-30 10%, con una disminución del 51.51%, su diferencia radica en el tipo de ensayo empleado; en el ensayo de absorción capilar, la porosidad se mide a partir de la absorptividad que es la propiedad que caracteriza la tendencia de un material poroso para absorber y transmitir agua por capilaridad, mientras que con el equipo Ruska la porosidad encontrada es la que puede ser ocupada por fluidos móviles (gases).

5.7 Ensayo de Solidez Bajo la Acción de Sulfatos.

Mediante este método se puede obtener información útil para juzgar la calidad de los materiales que han de estar sometidos a la acción de agentes atmosféricos, como cambios de temperatura o exposición a soluciones de sulfatos.

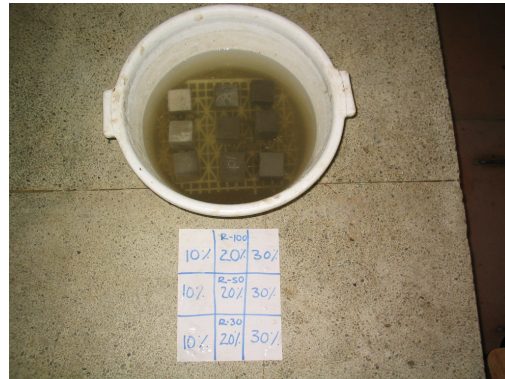
El ataque de sulfatos puede manifestarse en la forma de expansión, agrietamiento, pérdida de masa, desintegración, resquebrajamiento, desmenuzamiento, formación de lajas y/o descascaramiento.

En las Fotografías 57 a la 62 se puede apreciar el desgaste producido por los siete ciclos de exposición a sulfatos.

Fotografías 57 y 58. Probetas iniciales y finales en el ensayo de solidez bajo la acción de sulfatos



Fotografías 59 y 60. Prueba de solidez bajo la acción de sulfatos

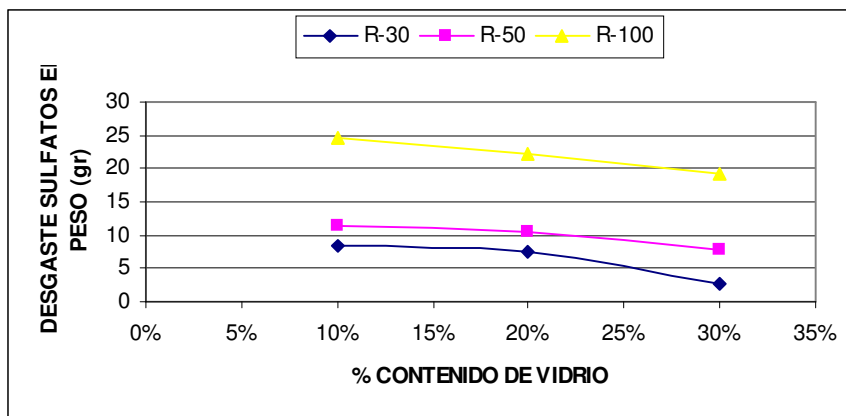


Fotografías 61 y 62. En detalle al ensayo solidez bajo la acción de sulfatos

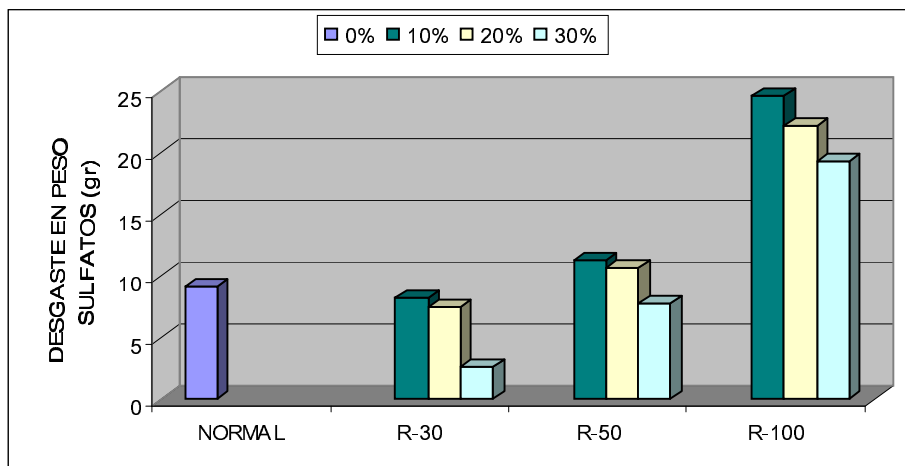


En la tabla 53 se muestran los resultados obtenidos de desgaste para los diferentes tipos de morteros. Para el análisis de los resultados se trazaron los gráficos 49 y 50 que ilustran el comportamiento ante el ataque por sulfatos.

Gráfica 49. Desgaste por Sulfatos a los 7 ciclos vs. Contenido de Vidrio



Gráfica 50. Desgaste por Sulfatos a los 7 ciclos de cada uno de los tipos de mortero



Análisis de Resultados.

Al analizar los resultados obtenidos en la tabla 53 y las gráficas 49 y 50, se puede apreciar que al disminuir el tamaño de las partículas de vidrio en los diferentes tipos

de mortero, el desgaste es mayor; por lo tanto, las partículas más grandes actúan como una barrera protectora a la acción los sulfatos.

A partir de un análisis cualitativo, se observó que para el mortero normal, la pérdida de peso se vio representada a manera de agrietamiento y descascaramiento total de la capa externa de las probetas, sin presentar expansiones o ensanchamientos.

Para las muestras de tamaño R30, se observó:

- 10% de vidrio: hubo poco cambio en su forma, además presento un reducido descascaramiento, pocas grietas y no se presentaron expansiones.
- 20% de Vidrio: no hubo descascaramiento, no hubo expansiones ni grietas.
- 30% de Vidrio: no hubo descascaramiento, no hubo expansiones ni grietas.

El comportamiento anterior es debido a que al incrementar el contenido de vidrio, aumenta en los morteros la tendencia para resistir el ataque de sulfatos, pues el vidrio es más tolerante ante los ambientes agresivos que los materiales usados en los morteros comunes, logrando pocas expansiones y baja desintegración.

Para las muestras de tamaño R50, se observó:

- 10% de Vidrio: poco descascaramiento, pocas grietas, baja expansión.
- 20% de Vidrio: poco descascaramiento, no se presentaron grietas, baja expansión.
- 30% de Vidrio: no hubo descascaramiento, hubo pocas expansiones ni grietas.

Para las muestras de tamaño R100, se observó:

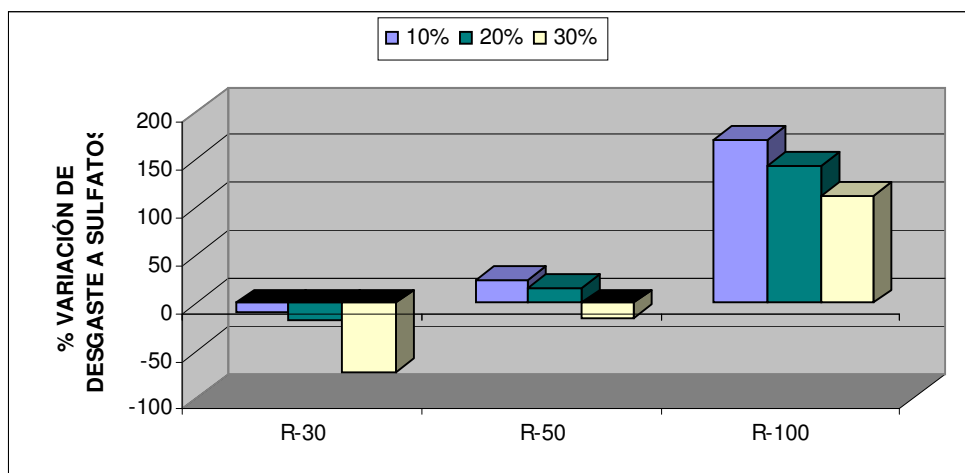
- 10% de Vidrio: elevado descascaramiento, generando expansiones visibles, y presentó grietas en su estructura desintegrando la probeta en varios fragmentos.
- 20% de Vidrio: alto descascaramiento, presentó grietas en su estructura generando expansiones visibles.

- 30% de Vidrio: descascaramiento, un buen número de grietas y una elevada expansión

Este comportamiento se debe a que al aumentar el contenido de partículas muy finas, disminuye la adhesión entre las partículas, disminuye su durabilidad; produciendo tensiones internas, que al ser mayores que las fuerzas de adhesión entre las partículas de vidrio y la matriz del mortero, provocan las expansiones y su posterior desintegración.

Además, se observó que para las probetas de mortero R-30 30% hay una reducción al ataque de sulfatos con respecto a la normal de 71.94%.

Gráfica 51. Porcentaje de Variación del Desgaste por Sulfatos



5.8 Ensayo para Determinar el Coeficiente de Difusión y Permeabilidad al Ión Cloruro

Mediante titulación química, se determinaron periódicamente la concentración de cloruros totales equivalentes de la siguiente manera:

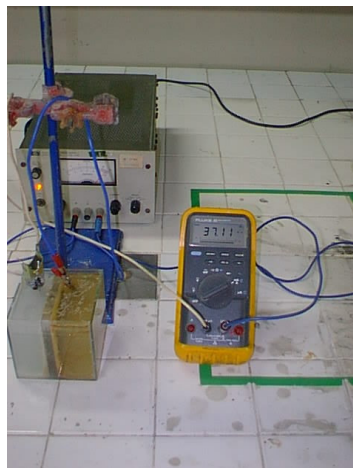
- Se midieron en una pipeta volumétrica 25 ml. del reactivo titulante (Nitrato de plata de normalidad $N = 0.01$). Se tomaron muestras de 1 ml. (con una pipeta volumétrica) de la semicelda, a la cual pasaban los cloruros mediante conducción por un campo eléctrico (solución prueba $\text{Ca}(\text{OH})_2$). Cada muestra se vació en un erlenmeyer y se agregó una gota de dicromato de potasio (reactivo indicador) y 5 ml de agua destilada para disminuir su concentración.
- Se procedió a titular hasta que la muestra tomara un color rojizo-pardo, momento en el cual se detuvo la titulación y se midió el volumen gastado de titulante.

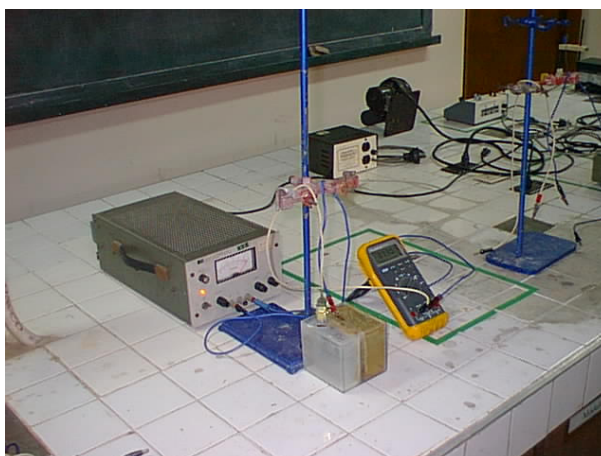
Para el cálculo de la concentración de cloruros en mg/l se utilizó la siguiente fórmula:

$$(\text{mg. / L}) \text{ NaCl} = (1000 * \text{Peso Equiv. Nt} * V_t) / V_m (\text{mg. / L})$$

donde (mg. / L) NaCl, es la concentración de cloruros, Nt es la normalidad del titulante ($N = 0.01$), V_t es el volumen de titulante gastado y V_m es el volumen de la muestra en estudio. En los Anexos tabla 54 se encuentran las concentraciones de cada muestra.

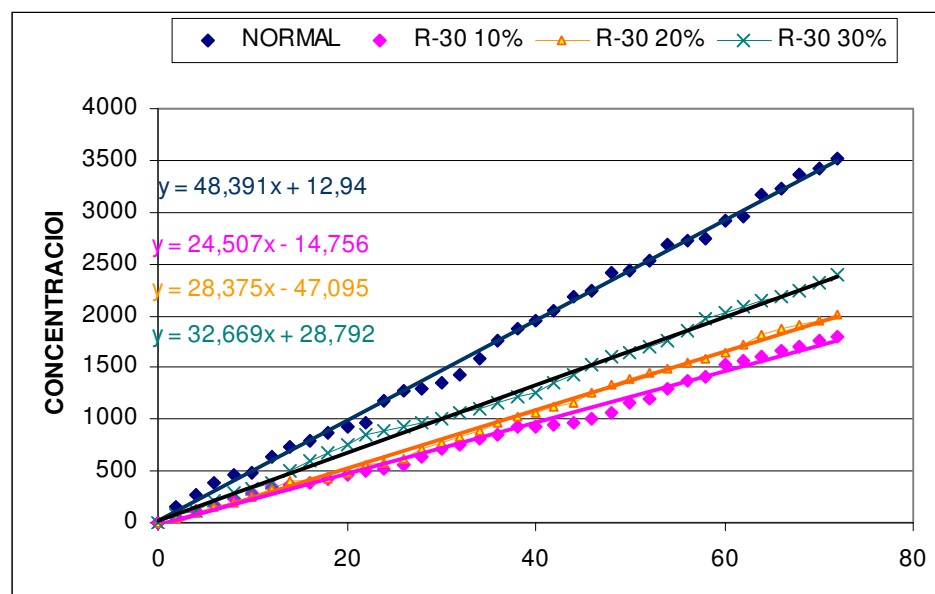
Fotografías 63, 64 y 65. Montaje del ensayo al ión cloruro



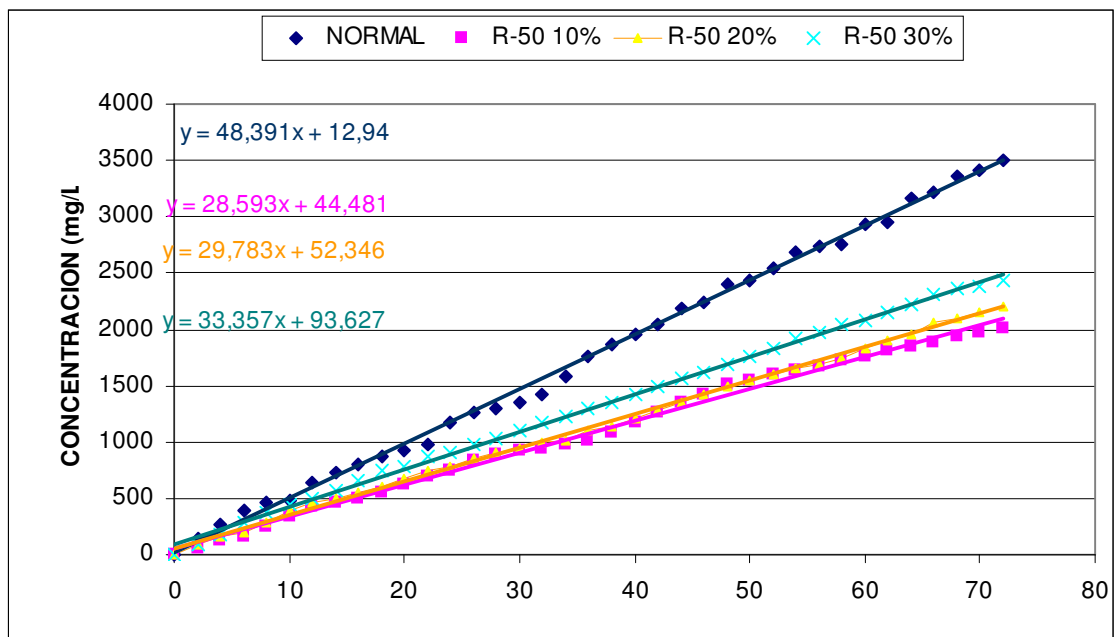


Para realizar la evaluación del coeficiente de difusión, se trazaron tres gráficos de Concentración-tiempo (uno para cada tamaño de partículas) y mediante regresión lineal, se determinó la pendiente en la zona lineal de cada una de las curvas obtenidas, para el cálculo del flujo iónico (J).

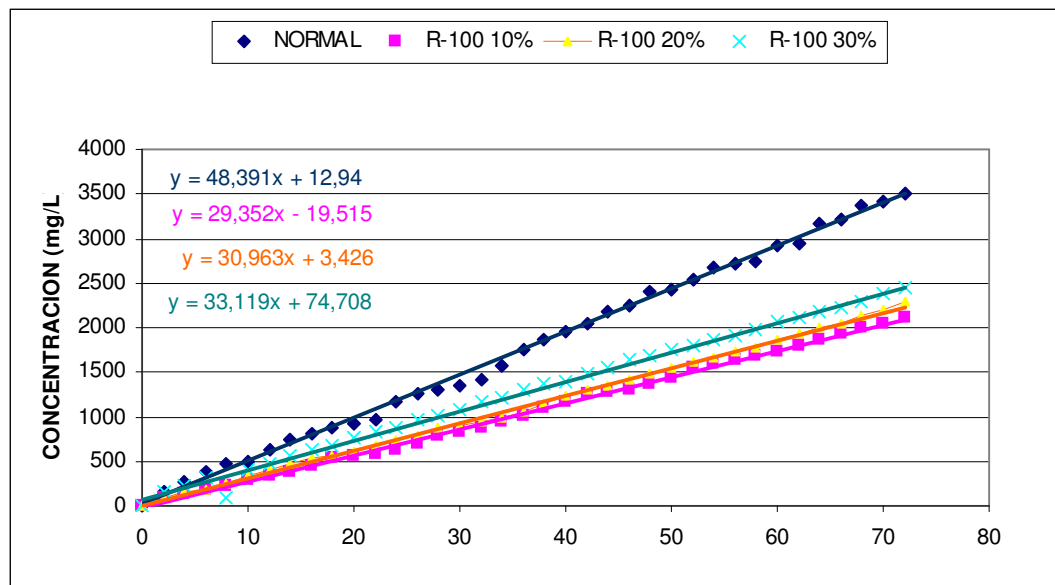
Gráfica 52. Concentración vs. Tiempo para el Tamaño R30



Gráfica 53. Concentración vs. Tiempo para el Tamaño R50



Gráfica 54. Concentración vs. Tiempo para el Tamaño R100



Se calculó el coeficiente de difusión de los diferentes tipos de mortero. Ver tabla 55 y las Gráficas 52, 53 y 54.

A continuación presentamos un ejemplo de cálculo del coeficiente de difusión efectivo (D_{eff}), para la muestra de mortero NORMAL. La duración del ensayo fue de 72 horas como es recomendado por la norma ASTM C1202.

Las condiciones fueron las siguientes:

$T = 308^\circ \text{K}$; $R = 1.9872 \text{ cal / mol }^\circ \text{K}$; $F = 23063 \text{ cal / V.eq}$; $E = 12\text{V}$; $z = -1$ para el anión cloruro; $C = 0.51 \text{ eq/L}$ (3% NaCl); $L = 1 \text{ cm}$.

De la ecuación y asumiendo un coeficiente de actividad (γ) uno, tenemos:

$$D_{\text{eff}} = \frac{JRTL}{zFC \Delta E \gamma} \quad (\text{m}^2/\text{s})$$

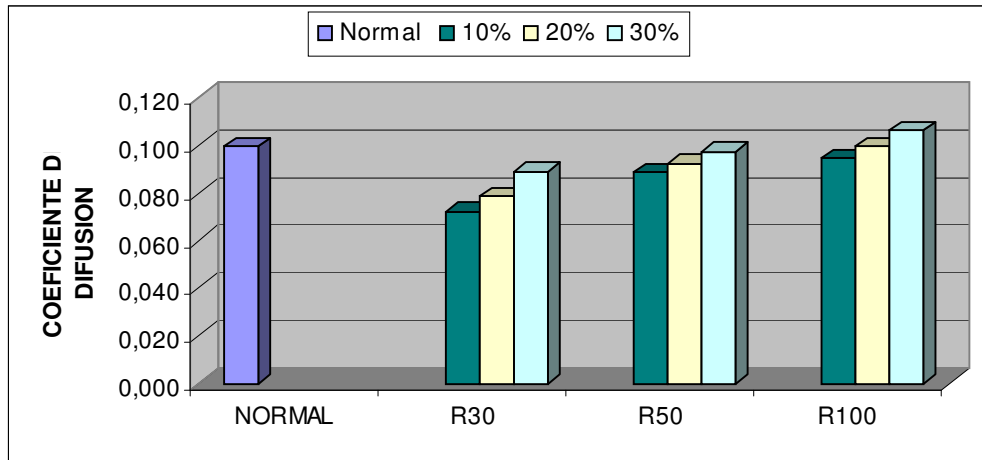
$\Delta E(x) = \frac{E}{L}$, donde L representa el espesor del espécimen (cm),

De acuerdo con las gráficas 52, 53 y 54, se tiene que:

$$J_1 = m_1 = 48.391 \text{ mg. / L.h} = 2.30 \text{ e-7 eq / L.s}$$

$$D_{\text{eff}} = \frac{2.30 \text{e-7} (\text{eq/l} * \text{s}) * 1.9872 (\text{cal/mol} * ^\circ \text{K}) * 308^\circ \text{K} * (0.01 \text{m})^2}{(-1) * 23063 (\text{Cal/V} * \text{eq}) * 0.51 (\text{eq/L}) * 12 (\text{V}) * 1} = 0.098 \text{e-12 m}^2 / \text{s}$$

Gráfica 55. Valores de Coeficiente de Difusión



Comparando los coeficientes de difusión obtenidos con otras investigaciones realizadas en la UIS:

Para un mortero con adiciones de 20% de ceniza volante (A/C 0.65) $0.59 \text{ E-12 m}^2/\text{seg}$

Para un mortero convencional (A/C 0.65) 20% de ceniza volante $2.3 \text{ E-12 m}^2/\text{seg}$

A nivel Internacional para morteros utilizando cemento Pórtland español de elevado contenido de C_3A (P1); adiciones activas inorgánicas, artificiales y puzolanicas, como arcilla activada mezclada con cuarzo (M1) y arcilla activada pura (M0).

Para un Mortero denominado P1/M0 (50%) de resistencia a la compresión 20 Mpa. $0.12 \text{ E-12 m}^2/\text{seg}$

Para un Mortero denominado P1/M1 (50%) de resistencia a la compresión 25 Mpa. $0.02 \text{ E-12 m}^2/\text{seg}$

Para un Mortero denominado P1/M1 (40%) $0.36 \text{ E-12 m}^2/\text{seg}$

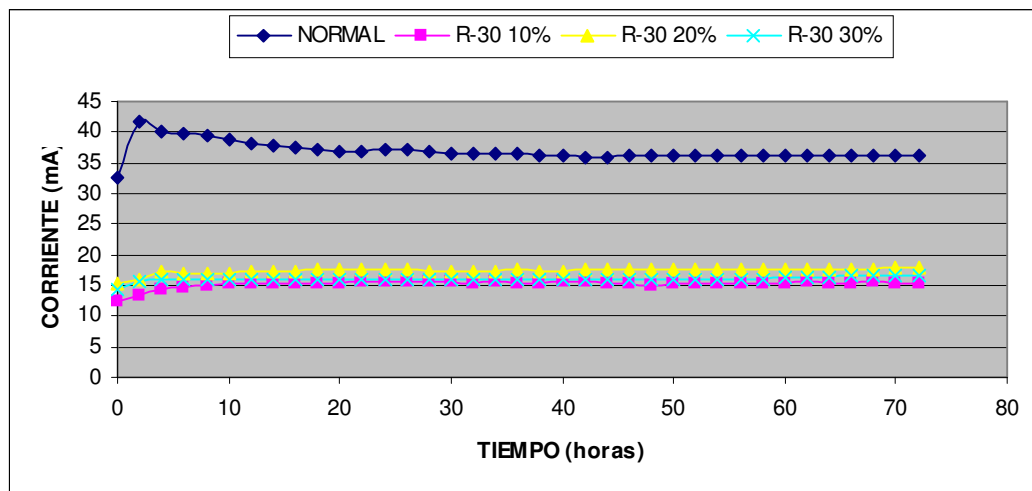
de resistencia a la compresión 30Mpa

Por lo tanto, se ve que en la mayoría de las mezclas de morteros usados en este proyecto están por debajo de los valores de coeficientes de difusión de otros tipos de morteros fabricados y ensayados para este fenómeno.

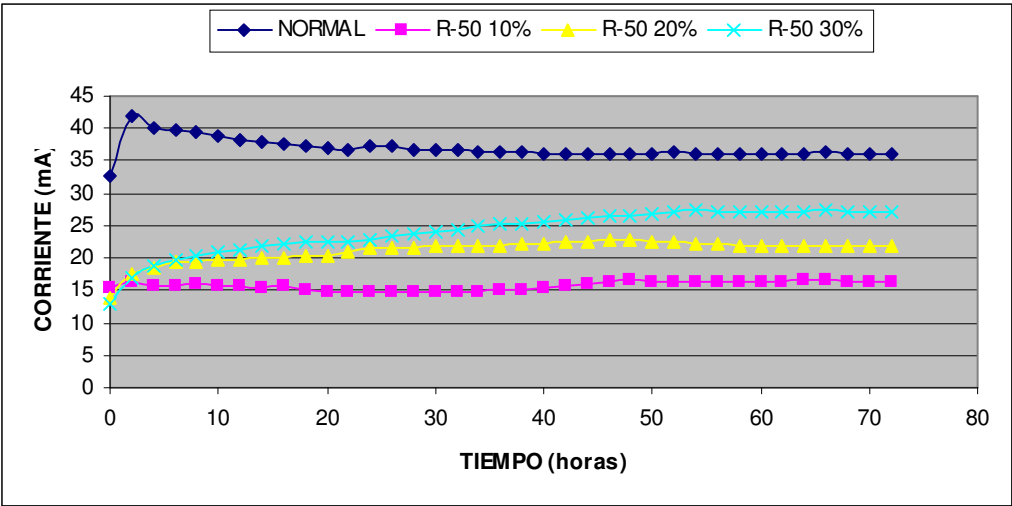
Siguiendo el análisis de los resultados, se trazaron las curvas de corriente en miliamperios contra tiempo en minutos, para la evaluación de la carga neta transportada en columbios a través de cada probeta, como el área bajo la curva.

Estos valores de carga son una medida del grado de permeabilidad frente al anión cloruro de las mezclas de mortero diseñadas.

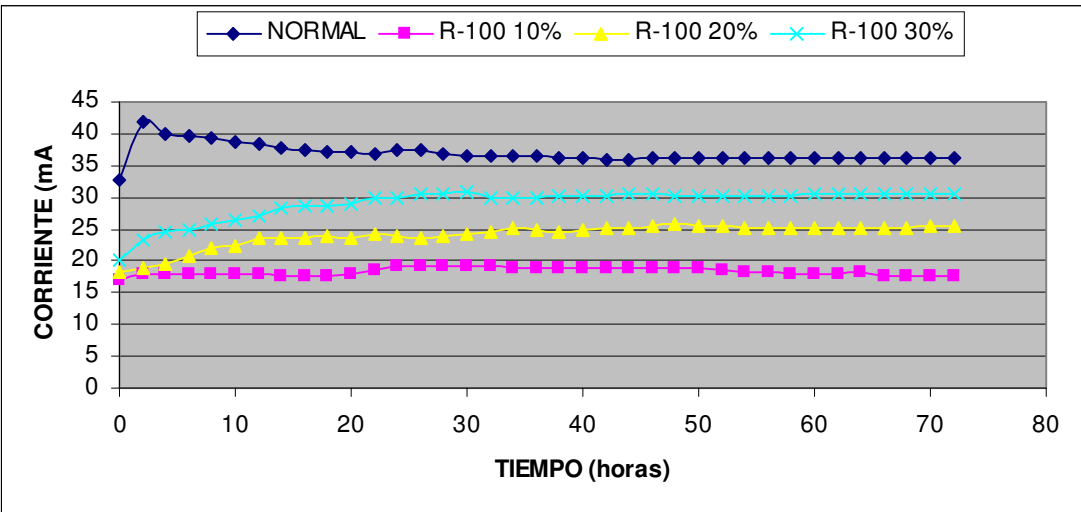
Gráfica 56. Corriente vs. Tiempo para el Tamaño R30



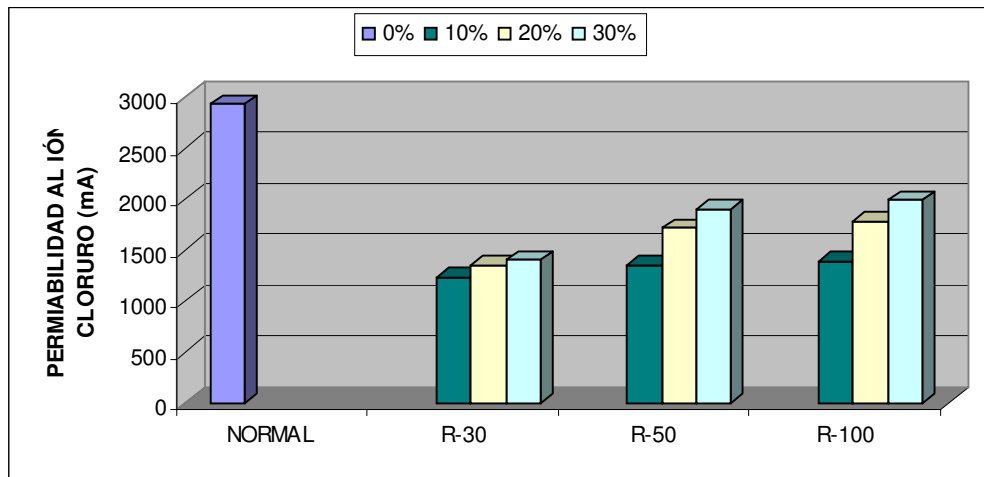
Gráfica 57. Corriente vs. Tiempo para el Tamaño R50



Gráfica 58. Corriente vs. Tiempo para el Tamaño R100



Gráfica 59. Valores de Permeabilidad al Ion Cloruro



Análisis de Resultados.

En la mayoría de los morteros con adiciones de vidrio analizados, se obtuvieron valores de coeficientes de difusión son menores que el mortero normal. Ver graficas 56, 57 y 58. Para todos tamaños, el coeficiente de difusión aumenta al aumentar el contenido de vidrio (resultados esperados de acuerdo a los ensayos anteriores). De esta forma se puede decir que las muestras con aditivos de vidrio presentan una alta resistencia a la penetración de iones agresivos debido a su composición química, contrario al comportamiento del mortero normal, el cual no es adecuado para aplicaciones en ambientes salinos.

Mediante el cálculo de la Permeabilidad al ión cloruro o carga (área bajo la curva de corriente vs. Tiempo), ver graficas 56, 57 y 58 se obtuvo una menor permeación para las muestras de mayor tamaño y menor contenido de vidrio. Además el mortero R-30 10% se reduce un 60% con respecto al normal, similar al resultado de permeabilidad Ruska.

CONCLUSIONES

- ✓ Se logró reducir la reacción álcali-agregado de la sílice del vidrio con los álcalis del cemento, evitando el fenómeno **RAS**, por medio de una estabilización química.
- ✓ A medida que aumenta el contenido de vidrio en las mezclas de morteros, disminuye el esfuerzo a la compresión, presentando la mayor resistencia las mezclas de mortero con adición de partículas de vidrio retenidas en el tamiz No.30. También, al aumentar el tamaño de las partículas de vidrio (R-30, R-50 y R-100) logra aumentar su resistencia a la compresión, comportándose mejor la probeta con mezcla de mortero R-30 10% con un aumento de 16.83 % de la resistencia con respecto al mortero normal.
- ✓ Al aumentar el contenido de vidrio en las mezclas de morteros, disminuye el esfuerzo a la flexión, presentando la mayor resistencia las mezclas de mortero con adición de partículas de vidrio retenidas en el tamiz No.30, al igual que en las pruebas de compresión. Para la mezcla de mortero R-30 10%, la cual presentó el mayor esfuerzo a flexión con respecto a los demás tipos de mortero, obtuvo un aumento del 2.35 % de la resistencia normal. En general el esfuerzo a flexión del mortero modificado estuvo por debajo del mortero normal.
- ✓ Para el esfuerzo a la tracción se puede concluir que éste aumenta al incrementarse el tamaño de las partículas de vidrio, siendo en todos los casos superior al mortero normal. Este comportamiento se puede explicar debido a que las partículas tienden a ser granos, que logran reforzar el plano de falla del material. Para la mezcla de mortero R-30 10% presentó el mayor esfuerzo a

- ✓ tracción 26.93 kg/cm^2 con respecto a los demás tipos de mortero, representando un incremento de 49.61% de la resistencia normal.

- ✓ La porosidad, permeabilidad y absorción capilar aumentan a medida que aumenta el contenido de vidrio en las mezclas de mortero, debido a que las partículas no logran distribuirse adecuadamente dentro de la matriz, por la incongruencia entre la forma de las partículas de vidrio y los granos de arena. También, al disminuir el tamaño de las partículas de vidrio y aumentar su proporción, disminuye la fluidez y éstas, por no tener una distribución uniforme, no permiten eliminar los poros naturales de la mezcla en la estructura interna de la matriz del mortero. El comportamiento más favorable lo lograron las partículas de vidrio retenidas por el tamiz No.30. La mezcla de mortero R-30 10% obtuvo los mejores resultados con una reducción de la porosidad del 47.02%, de la permeabilidad del 73.76% con respecto a la de un mortero normal.

- ✓ Los morteros con mezcla de agregado de vidrio de granulometrías R-30 al realizar las pruebas de porosidad presentaron valores más bajos que los de granulometrías R-100, contrario a lo que inicialmente suponíamos, lo cual nos indica que los morteros de R-30 presentan mejor comportamiento ante los agentes agresivos externos, pues la porosidad es inversamente proporcional a la compacidad y mientras más alta sea ésta, expresa en que magnitud el mortero proteja el acero de refuerzo contra el ataque de los cloruros.

- ✓ Los valores para el ensayo de permeabilidad aumentan a medida que crece el contenido de vidrio en las mezclas de morteros, ya que el paso de fluidos a través del material es función de la porosidad. Además, en todos los casos sus valores son menores a los correspondientes a un mortero normal.

- ✓ En cuanto al fenómeno de absorción capilar, todas las mezclas de mortero con adiciones de vidrio presentaron una mayor resistencia a la penetración del agua, menor coeficiente de absorción, menor absortividad y menor porosidad. El mejor comportamiento tamaño desempeño corresponde para los morteros con el 10% de vidrio. Corroborando los resultados de los ensayos de porosidad y permeabilidad realizados anteriormente con los equipos Ruska.
- ✓ Teniendo en cuenta los resultados de porosidad (Ensayo de Absorción capilar y Ensayo de Porosidad Porosímetro de Campo Ruska), se concluye que el grado de confiabilidad de los resultados de porosidad es elevado, ya que se encuentran en el mismo rango.
- ✓ Para el ensayo de solidez de sulfatos, se puede apreciar que al disminuir el tamaño de las partículas de vidrio en los diferentes tipos de mortero, el desgaste es mayor; por lo tanto, las partículas más grandes actúan como una barrera protectora a la acción de los sulfatos. Además, al aumentar la cantidad de vidrio en las mezclas de mortero se reduce el desgaste, pues el vidrio es más tolerante ante los ambientes agresivos que los materiales usados en los morteros comunes, logrando pocas expansiones y baja desintegración. Al final del ciclo los morteros que tuvieron mejor comportamiento eran los que contenían partículas de vidrio retenidas en el tamiz No 30. Además, se observó que para las probetas de mortero R-30 30% hay una reducción al ataque de sulfatos con respecto a la normal de 71.94%.
- ✓ Para el ensayo del ión cloruro, la mayoría de los morteros con adiciones de vidrio analizados obtuvieron valores de coeficientes de difusión menores que el mortero normal. Para todos los tamaños, el coeficiente de difusión aumenta al aumentar el contenido de vidrio (resultados esperados de acuerdo a los ensayos anteriores). De esta forma, se puede decir que las muestras con aditivos de vidrio presentan una alta resistencia a la penetración de iones agresivos debido

a su composición química, contrario al comportamiento del mortero normal el cual no es adecuado para aplicaciones en ambientes salinos.

- ✓ La resistencia a la tracción y a la flexión de un mortero con adiciones de vidrio, al igual que el mortero normal, es directamente proporcional a la resistencia de compresión del mismo, pero con valores inferiores, testificando la naturaleza frágil del mortero.

- ✓ La presencia de adiciones de vidrio de muy bajas granulometrías (R-100), aumenta la manejabilidad de las mezclas de mortero; pero por otra parte, disminuye su resistencia, variables que se deben tener en cuenta cuando se diseñe una mezcla de mortero en función de su uso.

RECOMENDACIONES

Dentro de las recomendaciones a realizar, encontramos de diferente índole, algunas obedecen a puntos específicos de análisis y estudios, algunas acerca del desarrollo de la investigación y otras de orden general acerca de futuras investigaciones, puesto que este proyecto es el primer peldaño en el estudio de un tema más universal que ofrece muchas posibilidades de trabajo y superación personal.

- ✓ Al realizar la mezcla de los diferentes productos que componen la pasta del mortero es de gran importancia realizar el mezclado en seco, que garantice la homogeneidad de las partículas para cuando se realice la hidratación de la mezcla, ésta presente mejores resultados.
- ✓ La distribución granulométrica de las partículas de vidrio juega un papel importante dentro del desarrollo de la resistencia de los morteros. Con adiciones de vidrio más uniformes creemos que se obtendrán mayores resistencias.
- ✓ Es necesario que al realizar los diferentes ensayos (normas ICONTEC), se sigan las recomendaciones y sugerencias para obtener resultados satisfactorios que reflejen la realidad de las propiedades analizadas.
- ✓ Realizar observaciones periódicas y ensayos de envejecimiento al comportamiento de los morteros con adiciones de vidrio.

- ✓ Utilizar otro tipo de tratamiento superficial con compuestos diferentes al propuesto en esta investigación (estireno), que sean de bajo costo y que proporcionen mayor adherencia entre el vidrio y la matriz del mortero, para mejorar las propiedades mecánicas del material y contemplar la posibilidad de poderlo aplicar en concretos.

- ✓ En el manejo y estudio de los morteros y sus adiciones existe un gran vacío, originado por el desconocimiento de los materiales que pueden servir como agregados. Esto se debe, en gran parte, al desconocimiento y falta de interés por parte de la industria de la construcción y la indiferencia que las instituciones de investigación muestran frente a este tema.

- ✓ Es necesario analizar el medio ambiente que nos rodea, la importancia de conservar los recursos naturales y el deber de responsabilizarnos de nuestros actos en contra de la naturaleza. Por ello, la academia está en la obligación de direccionar su espíritu investigativo hacia el desarrollo de proyectos que busquen la descontaminación de nuestro hábitat, y haga énfasis en la utilización de material reciclable en la industria de la construcción.

- ✓ Inculcar en los alumnos de pregrado de los semestres intermedios el espíritu investigativo especialmente en el área de materiales, ya que ellos pueden iniciar trabajos de grado que requieren tiempos de ejecución largos y así, evitar la improvisación en el desarrollo de las pruebas por alumnos de últimos niveles que buscan terminar lo más pronto posible sus trabajos de grado.

- ✓ Es necesario que exista más cooperación entre las diferentes escuelas, grupos de investigación y personas que conforman el ente universitario para el mejor desarrollo de los proyectos de grado.

- ✓ Los morteros con adiciones de vidrio como agregado son un campo nuevo de investigación y existe poca bibliografía sobre el tema; esperamos aportar un grano de arena en el vasto desierto del conocimiento para que este proyecto sirva como punto de referencia en futuras investigaciones.

BIBLIOGRAFÍA

- ACI, COMMITTEE 201. Proposed Revision of Guide to Durable Concrete. ACI Materials Journal, September – October, 1991.
- ALVAREZ MARTINEZ, Félix. El vidrio en la construcción, CEAD, Barcelona, 1968.
- ARAGÓN TOBÓN, Jesús Humberto. Los Morteros Mejorados en la Construcción, Reunión del Concreto, Cartagena 1990.
- ASTM C-1202, Standard Test method for electrical indication of Concrete's ability to resist chloride ion penetration, 1991.
- ASTM, Standard Test Method of Specific Gravity, Absorption, and Voids in Hardened Concrete.
- CABALLERO, Pedro Alberto, RÁMIREZ GARCÍA, Alvaro y BUITRAGO, Juan de Jesús. Tesis: Mejoramiento de las Propiedades del Concreto Mediante la Adición de un Material Polimérico. Ingeniería Civil. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 1975.

- CARVAJAL NIÑO, Leopoldo y LOAIZA CAMARGO, Jairo Iván. Tesis: Preparación y caracterización de concreto ligero agregado liviano: cascarilla de arroz impregnado con poliestireno, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 1975.
- CONCRETE INNOVATIONS. Concrete use for glass waste, Article 06, USA, 2002.
- GALLEGO H., William. Mortero de Pega y Mortero de Relleno para Mampostería Estructural.
- GUTIERREZ DE LÓPEZ, Libia. Análisis de las características de los agregados para concretos y morteros, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, 1994.
- HERNANDEZ, Rodolfo y SUAREZ, Sandra, Efecto del Ion Cloruro en el Acero de Refuerzo Expuesto a Soluciones Simuladas de Concreto, UIS, 1999.
- HERO, A. Fabricación y trabajo del vidrio, Editorial OSSO, Barcelona, 1948.
- ICONTEC. Norma 175: Método químico para determinar la reactividad potencial de agregados.
- MANUAL DE ROCAS Y FLUIDOS. Escuela de Ingeniería de Petróleos, UIS.

- MARTINO, Robert. Plastics help concrete bear the load, Modern Plastic, USA, 1974. P., 33.
- NOTICRETO. Tecnología del litio como solución a la reacción álcali-sílice, Revista Noticreto, Edición No. 62, Bogotá, 2003.
- PINILLA MORENO, Jersson Marco y BUENO CHACÓN, Erika. Tesis: Utilización de residuos de caucho en morteros y su aplicación en la construcción, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2003.
- PROGRAMA IBEROAMERICANODE CIENCIA TECNOLOGÍA Y DESARROLLO. Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón, CYTED, Caracas, 1998.
- QUINTERO P., Francisco J. Corrosión del Acero de Refuerzo en Estructuras de Concreto. Empresa Colombiana de Petróleos. Instituto Colombiano del Petróleo División de Tecnologías Complementarias. Piedecuesta. Santander. Noviembre, 1997.
- SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. Tecnología del Concreto y el Mortero, Pontificia Universidad Javeriana, Santafé de Bogotá, 1987.
- URIBE L., María Manuela. Historia del reciclaje del vidrio en Colombia, PELDAR, Medellín, 1991

- VANDERHOFF, J.W. Microestructure and strength of the Bond Between Concrete and Styrene-butadiene Latex-modified Motar, Highway Research Record No 370, USA, 1971.

- VIANCHA SALAZAR, Gustavo Adolfo y OLARTE DIAZ, Edgar. Tesis: Adecuación de la Fibra de Vidrio Tipo “E” Como Refuerzo del Mortero para su Utilización en la Fabricación de Elementos Delgados. Ingeniería Civil. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 1996.

ANEXOS

TABLAS DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE COMPRESION

Anexo 1. Resultados Ensayo de Compresión Mortero Normal

PROBETA NORMAL				
MORTERO 1:3				
ÁREA		25 cm^ 2		
TIEMPO 7 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	2400	96	97.00	1.095
2	2450	98		
3	2450	98		
4	2400	96		
5	2400	96		
6	2450	98		
TIEMPO 14 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	3300	132	133.33	1.633
2	3350	134		
3	3400	136		
4	3300	132		
5	3350	134		
6	3300	132		
TIEMPO 28 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	4300	172	174.33	1.506
2	4350	174		
3	4400	176		
4	4350	174		
5	4400	176		
6	4350	174		

Anexo 2. Resultados Ensayo de Compresión R-30 10%

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN				
CANTIDAD DE VIDRIO		10%		
TAMIZ RETENIDO		No. 30		
NOMENCLATURA		R-30 10%		
ÁREA		25 cm^ 2		
TIEMPO 7 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	3600	144	137.00	4.336
2	3500	140		
3	3400	136		
4	3300	132		
5	3400	136		
6	3350	134		
TIEMPO 14 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	4600	184	184.33	4.457
2	4400	176		
3	4600	184		
4	4700	188		
5	4700	188		
6	4650	186		
TIEMPO 28 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	5300	212	203.67	4.633
2	4950	198		
3	5050	202		
4	5050	202		
5	5100	204		
6	5100	204		

Anexo 3. Resultados Ensayo de Compresión R-30 20%

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN				
CANTIDAD DE VIDRIO		20%		
TAMIZ RETENIDO		No. 30		
NOMENCLATURA		R-30 20%		
ÁREA		25 cm^ 2		
TIEMPO 7 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	3050	122	126.33	2.944
2	3100	124		
3	3250	130		
4	3200	128		
5	3150	126		
6	3200	128		
TIEMPO 14 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	4050	162	163.00	2.757
2	4200	168		
3	4100	164		
4	4050	162		
5	4050	162		
6	4000	160		
TIEMPO 28 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	4300	172	174.67	3.011
2	4350	174		
3	4300	172		
4	4350	174		
5	4400	176		
6	4500	180		

Anexo 4. Resultados Ensayo de Compresión R-30 30%

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN				
CANTIDAD DE VIDRIO		30%		
TAMIZ RETENIDO		No. 30		
NOMENCLATURA		R-30 30%		
ÁREA		25 cm^ 2		
TIEMPO 7 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	2350	94	95.33	2.422
2	2450	98		
3	2400	96		
4	2350	94		
5	2300	92		
6	2450	98		
TIEMPO 14 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	3200	128	123.67	3.204
2	3000	120		
3	3000	120		
4	3100	124		
5	3100	124		
6	3150	126		
TIEMPO 28 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	3500	140	145.00	3.742
2	3700	148		
3	3600	144		
4	3750	150		
5	3550	142		
6	3650	146		

Anexo 5. Resultados Ensayo de Compresión R-50 10%

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN				
CANTIDAD DE VIDRIO		10%		
TAMIZ RETENIDO		No. 50		
NOMENCLATURA		R-50 10%		
ÁREA		25 cm^ 2		
TIEMPO 7 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	2800	112	116.33	3.670
2	2800	112		
3	3000	120		
4	2900	116		
5	2950	118		
6	3000	120		
TIEMPO 14 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	3600	144	139.33	3.933
2	3600	144		
3	3400	136		
4	3400	136		
5	3500	140		
6	3400	136		
TIEMPO 28 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	4100	164	162.00	2.191
2	4000	160		
3	4000	160		
4	4100	164		
5	4000	160		
6	4100	164		

Anexo 6. Resultados Ensayo de Compresión R-50 20%

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN				
CANTIDAD DE VIDRIO		20%		
TAMIZ RETENIDO		No. 50		
NOMENCLATURA		R-50 20%		
ÁREA		25 cm^ 2		
TIEMPO 7 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	2400	96	91.33	3.933
2	2400	96		
3	2300	92		
4	2200	88		
5	2200	88		
6	2200	88		
TIEMPO 14 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	2850	114	113.33	1.633
2	2800	112		
3	2800	112		
4	2800	112		
5	2850	114		
6	2900	116		
TIEMPO 28 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	3300	132	131.67	2.338
2	3300	132		
3	3350	134		
4	3350	134		
5	3250	130		
6	3200	128		

Anexo 7. Resultados Ensayo de Compresión R-50 30%

TAMIZ RETENIDO		No. 50		
NOMENCLATURA		R-50 30%		
ÁREA		25 cm^ 2		
TIEMPO 7 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	2100	84	83.67	1.506
2	2100	84		
3	2100	84		
4	2050	82		
5	2050	82		
6	2150	86		
TIEMPO 14 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	2500	100	100.67	1.033
2	2500	100		
3	2550	102		
4	2500	100		
5	2500	100		
6	2550	102		
TIEMPO 28 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	3050	122	120.33	1.506
2	3000	120		
3	3050	122		
4	3000	120		
5	3000	120		
6	2950	118		

Anexo 8. Resultados Ensayo de Compresión R-100 10%

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN				
CANTIDAD DE VIDRIO		10%		
TAMIZ RETENIDO		No. 100		
NOMENCLATURA		R-100 10%		
ÁREA		25 cm^ 2		
TIEMPO 7 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	2700	108	104.33	2.944
2	2650	106		
3	2600	104		
4	2650	106		
5	2500	100		
6	2550	102		
TIEMPO 14 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	3000	120	118.67	2.066
2	3050	122		
3	2950	118		
4	2950	118		
5	2900	116		
6	2950	118		
TIEMPO 28 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	3550	142	143.00	2.098
2	3550	142		
3	3500	140		
4	3600	144		
5	3650	146		
6	3600	144		

Anexo 9. Resultados Ensayo de Compresión R-100 20%

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN				
CANTIDAD DE VIDRIO		20%		
TAMIZ RETENIDO		No. 100		
NOMENCLATURA		R-100 20%		
ÁREA		25 cm^ 2		
TIEMPO 7 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	2000	80	82.00	1.789
2	2100	84		
3	2050	82		
4	2100	84		
5	2050	82		
6	2000	80		
TIEMPO 14 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	2550	102	104.33	1.506
2	2650	106		
3	2600	104		
4	2650	106		
5	2600	104		
6	2600	104		
TIEMPO 28 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	3050	122	121.33	2.066
2	3050	122		
3	2950	118		
4	3000	120		
5	3100	124		
6	3050	122		

Anexo 10. Resultados Ensayo de Compresión R-100 30%

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN				
CANTIDAD DE VIDRIO		30%		
TAMIZ RETENIDO		No. 100		
NOMENCLATURA		R-100 30%		
ÁREA		25 cm^ 2		
TIEMPO 7 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	1850	74	77.33	2.066
2	1900	76		
3	1950	78		
4	2000	80		
5	1950	78		
6	1950	78		
TIEMPO 14 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	2250	90	87.67	1.506
2	2200	88		
3	2200	88		
4	2150	86		
5	2150	86		
6	2200	88		
TIEMPO 28 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	2550	102	102.33	1.506
2	2550	102		
3	2550	102		
4	2600	104		
5	2500	100		
6	2600	104		

TABLAS DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE FLEXIÓN

Anexo 11. Resultados Ensayo de Flexión Normal

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA FLEXION				
PROBETA NORMAL				
MORTERO 1:3				
ÁREA		3,555 cm ²		
TIEMPO 7 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	Media (kg/cm ²)	Desviación Estandar
1	80	22.50	23.44	0.726
2	85	23.91		
3	85	23.91		
4	85	23.91		
5	80	22.50		
6	85	23.91		
TIEMPO 14 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	Media (kg/cm ²)	Desviación Estandar
1	100	28.13	28.13	1.258
2	95	26.72		
3	105	29.54		
4	95	26.72		
5	100	28.13		
6	105	29.54		
TIEMPO 28 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	Media (kg/cm ²)	Desviación Estandar
1	140	39.38	39.62	1.059
2	145	40.79		
3	140	39.38		
4	140	39.38		
5	145	40.79		
6	135	37.97		

Anexo 12. Resultados Ensayo de Flexión R-30 10%

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA FLEXION				
CANTIDAD DE VIDRIO		10%		
TAMIZ RETENIDO		No. 30		
NOMENCLATURA		R-30 10%		
ÁREA		3,555 cm^ 2		
TIEMPO 7 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	108	30.38	29.91	1.017
2	100	28.13		
3	110	30.94		
4	109	30.66		
5	105	29.54		
6	106	29.82		
TIEMPO 14 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	125	35.16	34.55	0.699
2	125	35.16		
3	120	33.76		
4	122	34.32		
5	125	35.16		
6	120	33.76		
TIEMPO 28 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	145	40.79	40.55	0.742
2	143	40.23		
3	144	40.51		
4	145	40.79		
5	140	39.38		
6	148	41.63		

Anexo 13. Resultados Ensayo de Flexión R-30 20%

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA FLEXION				
CANTIDAD DE VIDRIO		20%		
TAMIZ RETENIDO		No. 30		
NOMENCLATURA		R-30 20%		
ÁREA		3,555 cm^ 2		
TIEMPO 7 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	95	26.72	27.24	0.546
2	100	28.13		
3	95	26.72		
4	97	27.29		
5	96	27.00		
6	98	27.57		
TIEMPO 14 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	118	33.19	32.86	0.329
2	117	32.91		
3	115	32.35		
4	116	32.63		
5	117	32.91		
6	118	33.19		
TIEMPO 28 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	132	37.13	36.71	0.526
2	133	37.41		
3	130	36.57		
4	128	36.01		
5	129	36.29		
6	131	36.85		

Anexo 14. Resultados Ensayo de Flexión R-30 30%

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA FLEXION				
CANTIDAD DE VIDRIO		30%		
TAMIZ RETENIDO		No. 30		
NOMENCLATURA		R-30 30%		
ÁREA		3,555 cm^ 2		
TIEMPO 7 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	80	22.50	22.36	0.770
2	78	21.94		
3	77	21.66		
4	81	22.78		
5	84	23.63		
6	77	21.66		
TIEMPO 14 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	109	30.66	30.66	0.398
2	108	30.38		
3	111	31.22		
4	107	30.10		
5	109	30.66		
6	110	30.94		
TIEMPO 28 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	120	33.76	34.13	0.608
2	121	34.04		
3	118	33.19		
4	123	34.60		
5	122	34.32		
6	124	34.88		

Anexo 15. Resultados Ensayo de Flexión R-50 10%

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA FLEXION				
CANTIDAD DE VIDRIO		10%		
TAMIZ RETENIDO		No. 50		
NOMENCLATURA		R-50 10%		
ÁREA		3,555 cm^ 2		
TIEMPO 7 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	85	23.91	24.00	0.493
2	83	23.35		
3	86	24.19		
4	86	24.19		
5	84	23.63		
6	88	24.75		
TIEMPO 14 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	92	25.88	26.63	0.658
2	94	26.44		
3	93	26.16		
4	98	27.57		
5	94	26.44		
6	97	27.29		
TIEMPO 28 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	112	31.50	31.55	0.212
2	112	31.50		
3	113	31.79		
4	111	31.22		
5	113	31.79		
6	112	31.50		

Anexo 16. Resultados Ensayo de Flexión R-50 20%

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA FLEXION				
CANTIDAD DE VIDRIO		20%		
TAMIZ RETENIDO		No. 50		
NOMENCLATURA		R-50 20%		
ÁREA		3,555 cm^ 2		
TIEMPO 7 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	63	17.72	17.25	0.341
2	62	17.44		
3	62	17.44		
4	61	17.16		
5	60	16.88		
6	60	16.88		
TIEMPO 14 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	80	22.50	22.74	0.277
2	82	23.07		
3	81	22.78		
4	80	22.50		
5	82	23.07		
6	80	22.50		
TIEMPO 28 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	98	27.57	26.82	0.608
2	94	26.44		
3	97	27.29		
4	96	27.00		
5	92	25.88		
6	95	26.72		

Anexo 17. Resultados Ensayo de Flexión R-50 30%

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA FLEXION				
CANTIDAD DE VIDRIO		30%		
TAMIZ RETENIDO		No. 50		
NOMENCLATURA		R-50 30%		
ÁREA		3,555 cm^ 2		
TIEMPO 7 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	55	15.47	15.75	0.503
2	53	14.91		
3	57	16.03		
4	58	16.32		
5	57	16.03		
6	56	15.75		
TIEMPO 14 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	74	20.82	20.91	0.291
2	74	20.82		
3	76	21.38		
4	73	20.53		
5	74	20.82		
6	75	21.10		
TIEMPO 28 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	86	24.19	24.99	0.485
2	90	25.32		
3	89	25.04		
4	88	24.75		
5	89	25.04		
6	91	25.60		

Anexo 18. Resultados Ensayo de Flexión R-100 10%

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA FLEXION				
CANTIDAD DE VIDRIO		10%		
TAMIZ RETENIDO		No. 100		
NOMENCLATURA		R-100 10%		
ÁREA		3,555 cm^ 2		
TIEMPO 7 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	71	19.97	20.68	0.526
2	72	20.25		
3	75	21.10		
4	76	21.38		
5	73	20.53		
6	74	20.82		
TIEMPO 14 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	91	25.60	24.71	0.601
2	88	24.75		
3	85	23.91		
4	86	24.19		
5	88	24.75		
6	89	25.04		
TIEMPO 28 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	101	28.41	27.94	0.459
2	98	27.57		
3	101	28.41		
4	99	27.85		
5	97	27.29		
6	100	28.13		

Anexo 19. Resultados Ensayo de Flexión R-100 20%

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA FLEXION				
CANTIDAD DE VIDRIO		20%		
TAMIZ RETENIDO		No. 100		
NOMENCLATURA		R-100 20%		
ÁREA		3,555 cm^ 2		
TIEMPO 7 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	56	15.75	16.22	0.384
2	57	16.03		
3	58	16.32		
4	60	16.88		
5	58	16.32		
6	57	16.03		
TIEMPO 14 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	78	21.94	21.38	0.398
2	77	21.66		
3	76	21.38		
4	75	21.10		
5	74	20.82		
6	76	21.38		
TIEMPO 28 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	85	23.91	24.00	0.384
2	87	24.47		
3	86	24.19		
4	83	23.35		
5	85	23.91		
6	86	24.19		

Anexo 20. Resultados Ensayo de Flexión R-100 30%

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA FLEXION				
CANTIDAD DE VIDRIO		30%		
TAMIZ RETENIDO		No. 100		
NOMENCLATURA		R-100 30%		
ÁREA		3,555 cm^ 2		
TIEMPO 7 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	48	13.50	13.22	0.356
2	47	13.22		
3	48	13.50		
4	45	12.66		
5	46	12.94		
6	48	13.50		
TIEMPO 14 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	66	18.57	18.47	0.230
2	65	18.28		
3	66	18.57		
4	67	18.85		
5	65	18.28		
6	65	18.28		
TIEMPO 28 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	80	22.50	21.33	0.699
2	74	20.82		
3	75	21.10		
4	76	21.38		
5	77	21.66		
6	73	20.53		

TABLAS DE RESULTADOS ENSAYOS DE TRACCIÓN

Anexo 21. Resultados ensayo de tracción probetas normales

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA TENSION				
PROBETA NORMAL				
MORTERO 1:3				
ÁREA		6,25 cm^2		
TIEMPO 7 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	75	12.00	13.07	0.653
2	85	13.60		
3	80	12.80		
4	85	13.60		
5	80	12.80		
6	85	13.60		
TIEMPO 14 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	90	14.40	14.93	0.413
2	95	15.20		
3	95	15.20		
4	90	14.40		
5	95	15.20		
6	95	15.20		
TIEMPO 28 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	110	17.60	18.00	0.438
2	115	18.40		
3	110	17.60		
4	115	18.40		
5	110	17.60		
6	115	18.40		

Anexo 22. Resultados Ensayo de Tracción R-30 10%

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA TENSION				
CANTIDAD DE VIDRIO		10%		
TAMIZ RETENIDO		No. 30		
NOMENCLATURA		R-30 10%		
ÁREA		6,25 cm^ 2		
TIEMPO 7 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	135	21.60	19.93	1.171
2	127.5	20.40		
3	130	20.80		
4	120	19.20		
5	117.5	18.80		
6	117.5	18.80		
TIEMPO 14 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	150	24.00	23.60	0.716
2	155	24.80		
3	145	23.20		
4	142.5	22.80		
5	147.5	23.60		
6	145	23.20		
TIEMPO 28 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	165	26.40	26.93	0.826
2	170	27.20		
3	170	27.20		
4	170	27.20		
5	175	28.00		
6	160	25.60		

Anexo 23. Resultados Ensayo de Tracción R-30 20%

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA TENSION				
CANTIDAD DE VIDRIO		20%		
TAMIZ RETENIDO		No. 30		
NOMENCLATURA		R-30 20%		
ÁREA		6,25 cm^ 2		
TIEMPO 7 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	112.5	18.00	18.33	0.816
2	115	18.40		
3	107.5	17.20		
4	122.5	19.60		
5	117.5	18.80		
6	112.5	18.00		
TIEMPO 14 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	132.5	21.20	21.27	0.532
2	137.5	22.00		
3	132.5	21.20		
4	132.5	21.20		
5	135	21.60		
6	127.5	20.40		
TIEMPO 28 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	145	23.20	23.67	0.468
2	147.5	23.60		
3	152.5	24.40		
4	150	24.00		
5	145	23.20		
6	147.5	23.60		

Anexo 24. Resultados Ensayo de Tracción R-30 30%

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA TENSION				
CANTIDAD DE VIDRIO		30%		
TAMIZ RETENIDO		No. 30		
NOMENCLATURA		R-30 30%		
ÁREA		6,25 cm^ 2		
TIEMPO 7 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	92.5	14.80	15.07	0.413
2	97.5	15.60		
3	97.5	15.60		
4	92.5	14.80		
5	92.5	14.80		
6	92.5	14.80		
TIEMPO 14 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	112.5	18.00	18.53	0.484
2	117.5	18.80		
3	112.5	18.00		
4	115	18.40		
5	120	19.20		
6	117.5	18.80		
TIEMPO 28 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	127.5	20.40	21.27	0.641
2	137.5	22.00		
3	132.5	21.20		
4	130	20.80		
5	132.5	21.20		
6	137.5	22.00		

Anexo 25. Resultados Ensayo de Tracción R-50 10%

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA TENSION				
CANTIDAD DE VIDRIO		10%		
TAMIZ RETENIDO		No. 50		
NOMENCLATURA		R-50 10%		
ÁREA		6,25 cm^ 2		
TIEMPO 7 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	120	19.20	19.04	0.268
2	117	18.72		
3	120	19.20		
4	121	19.36		
5	119	19.04		
6	117	18.72		
TIEMPO 14 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	137.5	22.00	21.53	0.301
2	135	21.60		
3	132.5	21.20		
4	135	21.60		
5	132.5	21.20		
6	135	21.60		
TIEMPO 28 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	152.5	24.40	24.40	0.716
2	147.5	23.60		
3	147.5	23.60		
4	157.5	25.20		
5	152.5	24.40		
6	157.5	25.20		

Anexo 26. Resultados Ensayo de Tracción R-50 20%

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA TENSION				
CANTIDAD DE VIDRIO		20%		
TAMIZ RETENIDO		No. 50		
NOMENCLATURA		R-50 20%		
ÁREA		6,25 cm^ 2		
TIEMPO 7 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	107.5	17.20	15.60	0.980
2	97.5	15.60		
3	92.5	14.80		
4	100	16.00		
5	90	14.40		
6	97.5	15.60		
TIEMPO 14 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	120	19.20	19.13	0.927
2	112.5	18.00		
3	117.5	18.80		
4	125	20.00		
5	127.5	20.40		
6	115	18.40		
TIEMPO 28 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	140	22.40	22.33	0.301
2	142.5	22.80		
3	137.5	22.00		
4	140	22.40		
5	137.5	22.00		
6	140	22.40		

Anexo 27. Resultados Ensayo de Tracción R-50 30%

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA TENSION				
CANTIDAD DE VIDRIO		30%		
TAMIZ RETENIDO		No. 50		
NOMENCLATURA		R-50 30%		
ÁREA		6,25 cm^ 2		
TIEMPO 7 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	95	15.20	14.33	1.056
2	92.5	14.80		
3	92.5	14.80		
4	95	15.20		
5	80	12.80		
6	82.5	13.20		
TIEMPO 14 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	110	17.60	17.47	0.327
2	107.5	17.20		
3	110	17.60		
4	107.5	17.20		
5	112.5	18.00		
6	107.5	17.20		
TIEMPO 28 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	125	20.00	19.93	0.301
2	122.5	19.60		
3	122.5	19.60		
4	125	20.00		
5	125	20.00		
6	127.5	20.40		

Anexo 28. Resultados Ensayo de Tracción R-100 10%

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA TENSION				
CANTIDAD DE VIDRIO		10%		
TAMIZ RETENIDO		No. 100		
NOMENCLATURA		R-100 10%		
ÁREA		6,25 cm^ 2		
TIEMPO 7 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	102.5	16.40	17.40	0.704
2	112.5	18.00		
3	107.5	17.20		
4	115	18.40		
5	107.5	17.20		
6	107.5	17.20		
TIEMPO 14 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	127.5	20.40	19.67	0.641
2	122.5	19.60		
3	127.5	20.40		
4	117.5	18.80		
5	122.5	19.60		
6	120	19.20		
TIEMPO 28 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	145	23.20	22.07	0.855
2	132.5	21.20		
3	135	21.60		
4	140	22.40		
5	142.5	22.80		
6	132.5	21.20		

Anexo 29. Resultados Ensayo de Tracción R-100 20%

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA TENSION				
CANTIDAD DE VIDRIO		20%		
TAMIZ RETENIDO		No. 100		
NOMENCLATURA		R-100 20%		
ÁREA		6,25 cm^ 2		
TIEMPO 7 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	92.5	14.80	14.60	0.490
2	87.5	14.00		
3	92.5	14.80		
4	95	15.20		
5	87.5	14.00		
6	92.5	14.80		
TIEMPO 14 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	110	17.60	17.60	0.358
2	107.5	17.20		
3	112.5	18.00		
4	112.5	18.00		
5	110	17.60		
6	107.5	17.20		
TIEMPO 28 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	127.5	20.40	20.27	0.653
2	132.5	21.20		
3	130	20.80		
4	125	20.00		
5	122.5	19.60		
6	122.5	19.60		

Anexo 30. Resultados Ensayo de Tracción R-100 30%

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA TENSION				
CANTIDAD DE VIDRIO		30%		
TAMIZ RETENIDO		No. 100		
NOMENCLATURA		R-100 30%		
ÁREA		6,25 cm^ 2		
TIEMPO 7 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	82.5	13.20	13.00	0.420
2	80	12.80		
3	82.5	13.20		
4	85	13.60		
5	80	12.80		
6	77.5	12.40		
TIEMPO 14 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	100	16.00	16.40	0.358
2	105	16.80		
3	102.5	16.40		
4	100	16.00		
5	105	16.80		
6	102.5	16.40		
TIEMPO 28 DIAS				
Probeta No.	Fuerza (kg)	Resistencia (Kg/cm^2)	Media (kg/cm^2)	Desviación Estandar
1	110	17.60	18.07	0.468
2	112.5	18.00		
3	115	18.40		
4	112.5	18.00		
5	110	17.60		
6	117.5	18.80		

TABLAS ENSAYO DE POROSIDAD

Anexo 31. Valores de Porosidad de Mortero Normal

DETERMINACIÓN DE LA POROSIDAD				
MÉTODO POROSÍMETRO DE CAMPO RUSKA				
DATOS				
TIPO DE MUESTRA	Mortero Normal	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3
TAMAÑO COPA	Medium	Volumen (cm3 [^])	Volumen (cm3 [^])	Volumen (cm3 [^])
R Core		4.60	5.00	5.25
R Hg		5.55	6.00	6.30
POROSIDAD				
$P(\%) = (1 - (R \text{ CORE} / R \text{ Hg})) * 100$		17.12	16.67	16.67
% POROSIDAD PROMEDIO		16.82		

Anexo 32. Valores de Porosidad de Mortero R-30 10%

DETERMINACIÓN DE LA POROSIDAD				
MÉTODO POROSÍMETRO DE CAMPO RUSKA				
DATOS				
TIPO DE MUESTRA	Mortero R-30 10%	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3
TAMAÑO COPA	Medium	Volumen (cm3 [^])	Volumen (cm3 [^])	Volumen (cm3 [^])
R Core		4,95	4,95	5,50
R Hg		5,50	5,60	6,10
POROSIDAD				
$P(\%) = (1 - (R \text{ CORE} / R \text{ Hg})) * 100$		8,50	9,87	8,36
% POROSIDAD PROMEDIO		8,91		

Anexo 33. Valores de Porosidad de Mortero R-30 20%

DETERMINACIÓN DE LA POROSIDAD				
MÉTODO POROSÍMETRO DE CAMPO RUSKA				
DATOS				
TIPO DE MUESTRA	Mortero R-30 20%	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3
TAMAÑO COPA	Medium	Volumen (cm3 [^])	Volumen (cm3 [^])	Volumen (cm3 [^])
R Core		8,00	8,10	7,80
R Hg		9,20	9,10	9,10
POROSIDAD				
$P(\%) = (1 - (R \text{ CORE} / R \text{ Hg})) * 100$		11,09	9,34	12,14
% POROSIDAD PROMEDIO		10,86		

Anexo 34. Valores de Porosidad de Mortero R-30 30%

DETERMINACIÓN DE LA POROSIDAD				
MÉTODO POROSÍMETRO DE CAMPO RUSKA				
DATOS				
TIPO DE MUESTRA	Mortero R-30 30%	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3
TAMAÑO COPA	Medium	Volumen (cm3 [^])	Volumen (cm3 [^])	Volumen (cm3 [^])
R Core		8,50	8,55	8,60
R Hg		10,10	10,15	10,20
POROSIDAD				
$P(\%) = (1 - (R \text{ CORE} / R \text{ Hg})) * 100$		13,47	13,40	13,33
% POROSIDAD PROMEDIO		13,40		

Anexo 35. Valores de Porosidad de Mortero R-50 10%

DETERMINACIÓN DE LA POROSIDAD				
MÉTODO POROSÍMETRO DE CAMPO RUSKA				
DATOS				
TIPO DE MUESTRA	Mortero R-50 10%	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3
TAMAÑO COPA	Medium	Volumen (cm3 [^])	Volumen (cm3 [^])	Volumen (cm3 [^])
R Core		8,50	8,35	8,55
R Hg		9,65	9,55	9,75
POROSIDAD				
$P(\%) = (1 - (R \text{ CORE} / R \text{ Hg})) * 100$		11,92	12,57	12,31
% POROSIDAD PROMEDIO		11,65		

Anexo 36. Valores de Porosidad de Mortero R-50 20%

DETERMINACIÓN DE LA POROSIDAD				
MÉTODO POROSÍMETRO DE CAMPO RUSKA				
DATOS				
TIPO DE MUESTRA	Mortero R-50 20%	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3
TAMAÑO COPA	Medium	Volumen (cm3 [^])	Volumen (cm3 [^])	Volumen (cm3 [^])
R Core		8,10	8,00	8,05
R Hg		9,50	9,40	9,45
POROSIDAD				
$P(\%) = (1 - (R \text{ CORE} / R \text{ Hg})) * 100$		14,74	14,89	14,81
% POROSIDAD PROMEDIO		14,07		

Anexo 37. Valores de Porosidad de Mortero R-50 30%

DETERMINACIÓN DE LA POROSIDAD				
MÉTODO POROSÍMETRO DE CAMPO RUSKA				
DATOS				
TIPO DE MUESTRA	Mortero R-50 30%	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3
TAMAÑO COPA	Medium	Volumen (cm3 [^])	Volumen (cm3 [^])	Volumen (cm3 [^])
R Core		8,70	8,65	8,70
R Hg		10,50	10,40	10,50
POROSIDAD				
$P(\%) = (1 - (R \text{ CORE} / R \text{ Hg})) * 100$		17,14	16,83	17,14
% POROSIDAD PROMEDIO		16,19		

Anexo 38. Valores de Porosidad de Mortero R-100 10%

DETERMINACIÓN DE LA POROSIDAD				
MÉTODO POROSÍMETRO DE CAMPO RUSKA				
DATOS				
TIPO DE MUESTRA	Mortero R-100 10%	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3
TAMAÑO COPA	Medium	Volumen (cm3 [^])	Volumen (cm3 [^])	Volumen (cm3 [^])
R Core		7,40	7,50	7,35
R Hg		8,60	8,55	8,60
POROSIDAD				
$P(\%) = (1 - (R \text{ CORE} / R \text{ Hg})) * 100$		13,95	12,28	14,53
% POROSIDAD PROMEDIO		13,59		

Anexo 39. Valores de Porosidad de Mortero R-100 20%

DETERMINACIÓN DE LA POROSIDAD				
MÉTODO POROSÍMETRO DE CAMPO RUSKA				
DATOS				
TIPO DE MUESTRA	Mortero R-100 20%	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3
TAMAÑO COPA	Medium	Volumen (cm3 [^])	Volumen (cm3 [^])	Volumen (cm3 [^])
R Core		8,20	8,20	8,60
R Hg		9,70	9,80	10,10
POROSIDAD				
$P(\%) = (1 - (R \text{ CORE} / R \text{ Hg})) * 100$		15,46	16,33	14,85
% POROSIDAD PROMEDIO		15,55		

Anexo 40. Valores de Porosidad de Mortero R-100 30%

DETERMINACIÓN DE LA POROSIDAD				
MÉTODO POROSÍMETRO DE CAMPO RUSKA				
DATOS				
TIPO DE MUESTRA	Mortero R-100 30%	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3
TAMAÑO COPA	Medium	Volumen (cm ³)	Volumen (cm ³)	Volumen (cm ³)
R Core		8,70	8,75	8,75
R Hg		10,50	10,70	10,75
POROSIDAD $P(\%) = (1 - (R \text{ CORE} / R \text{ Hg})) * 100$		17,14	18,22	18,60
% POROSIDAD PROMEDIO		17,99		

TABLAS DE ENSAYOS DE PERMEABILIDAD

Anexo 41. Valores de Permeabilidad de Mortero Normal

DETERMINACIÓN DE LA PERMEABILIDAD CON GASES			
PERMEÁMETRO DE GAS RUSKA			
TIPO MUESTRA	Mortero Normal		
DATOS	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
AREA SECCIÓN TRANSVERSAL, A (cm ²)	11,401	11,401	11,401
LONGITUD MUESTRA, L (cm)	3,81	3,81	3,81
VISCOSIDAD DEL GAS, μ (cp)	0,0182	0,0182	0,0182
FLOWMETER (S, M, o L)	M	M	M
GRADIENTE DE PRESIÓN, P (atm)	0,5	0,5	0,7
LECTURA FLOWMETER, Rf	3,25	3,35	4,0
TASA PROM. FLUJO, Q (cm ³ /seg)	1,35	1,40	1,90
PERMEABILIDAD, K (mD)	16,422	17,030	16,509
PROMEDIO PERMEABILIDAD, K (mD)	16,65		

Anexo 42. Valores de Permeabilidad de Mortero R-30 10%

DETERMINACIÓN DE LA PERMEABILIDAD CON GASES			
PERMEÁMETRO DE GAS RUSKA			
TIPO MUESTRA	Mortero R-30 10%		
DATOS	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
ÁREA SECCIÓN TRANSVERSAL, A (cm ²)	4,75	4,670	4,69
LONGITUD MUESTRA, L (cm)	2,15	2,14	2,12
VISCOSIDAD DEL GAS, μ (cp)	0,0182	0,0182	0,0182
FLOWMETER (S, M, o L)	S	S	S
GRADIENTE DE PRESIÓN, P (atm)	0,75	0,75	0,75
LECTURA FLOWMETER, Rf	6,20	6,35	6,4
TASA PROM. FLUJO, Q (cm/seg)	0,27	0,30	0,31
PERMEABILIDAD, K (mD)	2,966	3,336	3,400
PROMEDIO PERMEABILIDAD, K (mD)	4,37		

Anexo 43. Valores de Permeabilidad de Mortero R-30 20%

DETERMINACIÓN DE LA PERMEABILIDAD CON GASES			
PERMEÁMETRO DE GAS RUSKA			
TIPO MUESTRA	Mortero R-30 20%		
DATOS	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
ÁREA SECCIÓN TRANSVERSAL, A (cm ²)	4,62	4,580	4,67
LONGITUD MUESTRA, L (cm)	2,11	2,09	2,14
VISCOSIDAD DEL GAS, μ (cp)	0,0182	0,0182	0,0182
FLOWMETER (S, M, o L)	S	S	S
GRADIENTE DE PRESIÓN, P (atm)	0,75	0,75	0,75
LECTURA FLOWMETER, Rf	8,50	8,30	8,4
TASA PROM. FLUJO, Q (cm/seg)	0,46	0,42	0,44
PERMEABILIDAD, K (mD)	5,098	4,651	4,893
PROMEDIO PERMEABILIDAD, K (mD)	6,25		

Anexo 44. Valores de Permeabilidad de Mortero R-30 30%

DETERMINACIÓN DE LA PERMEABILIDAD CON GASES			
PERMEÁMETRO DE GAS RUSKA			
TIPO MUESTRA	Mortero R-30 30%		
DATOS	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
ÁREA SECCIÓN TRANSVERSAL, A (cm ²)	4,644	4,550	4,48
LONGITUD MUESTRA, L (cm)	2,185	2,15	2,11
VISCOSIDAD DEL GAS, μ (cp)	0,0182	0,0182	0,0182
FLOWMETER (S, M, o L)	S	S	S
GRADIENTE DE PRESIÓN, P (atm)	0,75	0,75	0,75
LECTURA FLOWMETER, Rf	9,60	9,00	9,4
TASA PROM. FLUJO, Q (cm/seg)	0,52	0,50	0,51
PERMEABILIDAD, K (mD)	5,937	5,733	5,829
PROMEDIO PERMEABILIDAD, K (mD)	7,47		

Anexo 45. Valores de Permeabilidad de Mortero R-50 10%

DETERMINACIÓN DE LA PERMEABILIDAD CON GASES			
PERMEÁMETRO DE GAS RUSKA			
TIPO MUESTRA	Mortero R-50 10%		
DATOS	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
ÁREA SECCIÓN TRANSVERSAL, A (cm ²)	4,3	4,380	4,42
LONGITUD MUESTRA, L (cm)	2,2	2,25	2,29
VISCOSIDAD DEL GAS, μ (cp)	0,0182	0,0182	0,0182
FLOWMETER (S, M, o L)	S	S	S
GRADIENTE DE PRESIÓN, P (atm)	0,75	0,75	0,75
LECTURA FLOWMETER, Rf	10,60	10,80	10,7
TASA PROM. FLUJO, Q (cm/seg)	0,54	0,56	0,55
PERMEABILIDAD, K (mD)	6,704	6,981	6,915
PROMEDIO PERMEABILIDAD, K (mD)	6,87		

Anexo 46. Valores de Permeabilidad de Mortero R-50 20%

DETERMINACIÓN DE LA PERMEABILIDAD CON GASES			
PERMEÁMETRO DE GAS RUSKA			
TIPO MUESTRA	Mortero R-50 20%		
DATOS	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
ÁREA SECCIÓN TRANSVERSAL, A (cm ²)	4,62	4,700	4,58
LONGITUD MUESTRA, L (cm)	2,15	2,18	2,13
VISCOSIDAD DEL GAS, u (cp)	0,0182	0,0182	0,0182
FLOWMETER (S, M, o L)	S	S	S
GRADIENTE DE PRESIÓN, P (atm)	0,75	0,75	0,75
LECTURA FLOWMETER, Rf	11,20	11,50	11,7
TASA PROM. FLUJO, Q (cm/seg)	0,64	0,67	0,70
PERMEABILIDAD, K (mD)	7,227	7,541	7,900
PROMEDIO PERMEABILIDAD, K (mD)	7,56		

Anexo 47. Valores de Permeabilidad de Mortero R-50 30%

DETERMINACIÓN DE LA PERMEABILIDAD CON GASES			
PERMEÁMETRO DE GAS RUSKA			
TIPO MUESTRA	Mortero R-50 30%		
DATOS	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
ÁREA SECCIÓN TRANSVERSAL, A (cm ²)	4,73	4,770	4,8
LONGITUD MUESTRA, L (cm)	2,15	2,16	2,18
VISCOSIDAD DEL GAS, u (cp)	0,0182	0,0182	0,0182
FLOWMETER (S, M, o L)	M	S	M
GRADIENTE DE PRESIÓN, P (atm)	0,5	0,75	0,5
LECTURA FLOWMETER, Rf	2,00	12,50	2,0
TASA PROM. FLUJO, Q (cm/seg)	0,58	0,75	0,58
PERMEABILIDAD, K (mD)	9,596	8,242	9,588
PROMEDIO PERMEABILIDAD, K (mD)	9,14		

Anexo 48. Valores de Permeabilidad de Mortero R-100 10%

DETERMINACIÓN DE LA PERMEABILIDAD CON GASES			
PERMEÁMETRO DE GAS RUSKA			
TIPO MUESTRA	Mortero R-100 10%		
DATOS	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
ÁREA SECCIÓN TRANSVERSAL, A (cm ²)	4,85	4,84	4,85
LONGITUD MUESTRA, L (cm)	2,05	2,20	2,19
VISCOSIDAD DEL GAS, μ (cp)	0,0182	0,0182	0,0182
FLOWMETER (S, M, o L)	S	M	S
GRADIENTE DE PRESIÓN, P (atm)	0,75	0,5	0,75
LECTURA FLOWMETER, Rf	10,50	2,00	10,5
TASA PROM. FLUJO, Q (cm/seg)	0,65	0,65	0,65
PERMEABILIDAD, K (mD)	6,667	10,755	7,122
PROMEDIO PERMEABILIDAD, K (mD)	8,18		

Anexo 49. Valores de Permeabilidad de Mortero R-100 20%

DETERMINACIÓN DE LA PERMEABILIDAD CON GASES			
PERMEÁMETRO DE GAS RUSKA			
TIPO MUESTRA	Mortero R-100 20%		
DATOS	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
	4,82	4,86	4,85
LONGITUD MUESTRA, L (cm)	2,1	2,12	2,07
VISCOSIDAD DEL GAS, μ (cp)	0,0182	0,0182	0,0182
FLOWMETER (S, M, o L)	M	M	S
GRADIENTE DE PRESIÓN, P (atm)	0,5	0,5	0,75
LECTURA FLOWMETER, Rf	2,10	2,20	10,6
TASA PROM. FLUJO, Q (cm/seg)	0,70	0,68	0,76
PERMEABILIDAD, K (mD)	11,101	10,797	7,871
PROMEDIO PERMEABILIDAD, K (mD)	9,92		

Anexo 50. Valores de Permeabilidad de Mortero R-100 30%

DETERMINACIÓN DE LA PERMEABILIDAD CON GASES			
PERMEÁMETRO DE GAS RUSKA			
TIPO MUESTRA	Mortero R-100 30%		
DATOS	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
ÁREA SECCIÓN TRANSVERSAL, A (cm ²)	4,69	4,750	4,65
LONGITUD MUESTRA, L (cm)	2,1	2,11	2,12
VISCOSIDAD DEL GAS, μ (cp)	0,0182	0,0182	0,0182
FLOWMETER (S, M, o L)	M	M	S
GRADIENTE DE PRESIÓN, P (atm)	0,5	0,5	0,75
LECTURA FLOWMETER, Rf	2,60	2,65	12,7
TASA PROM. FLUJO, Q (cm/seg)	0,80	0,82	0,77
PERMEABILIDAD, K (mD)	13,039	13,259	8,519
PROMEDIO PERMEABILIDAD, K (mD)	11,61		

TABLA DE RESULTADOS PARA EL ENSAYO DE ABSORCIÓN CAPILAR

Anexo 51. Absorción de Agua para cada Tipo de Mortero

Tiempo Horas	T1/2	MASA DE AGUA ABSORBIDA (GRAMOS)									
		NORMAL	R-30 10%	R-30 20%	R-30 30%	R-50 10%	R-50 20%	R-50 30%	R-100 10%	R-100 20%	R-100 30%
0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,08	0,29	3,61	1,37	1,73	2,04	1,40	1,81	1,96	2,02	2,28	3,18
0,17	0,41	5,10	1,94	2,45	2,88	1,98	2,55	2,77	2,86	3,23	4,49
0,25	0,50	6,25	2,40	3,00	3,53	2,42	3,13	3,39	3,50	3,95	5,50
0,50	0,71	8,84	3,36	4,13	4,99	3,43	4,42	4,80	4,95	5,59	7,78
0,75	0,87	10,83	4,11	5,20	6,11	4,20	5,42	5,88	6,06	6,84	9,53
1,00	1,00	12,50	4,99	6,00	7,06	4,84	6,26	6,79	7,00	7,90	11,00
1,50	1,22	15,31	5,82	7,35	8,64	5,93	7,66	8,31	8,57	9,68	13,47
2,00	1,41	17,68	7,22	8,49	9,98	6,85	8,85	9,60	9,90	11,17	15,56
3,00	1,73	20,86	8,23	10,39	12,22	8,39	10,84	11,76	12,12	13,68	19,05
4,00	2,00	23,83	9,68	11,60	14,11	9,69	12,51	12,73	14,00	15,80	22,00
5,00	2,24	24,06	10,62	12,84	15,78	10,83	13,99	14,06	15,65	17,66	22,00
6,00	2,45	24,12	11,64	13,60	16,77	12,98	15,33	15,08	17,15	19,57	26,94
24,00	4,90	24,83	19,53	22,18	23,77	22,67	23,62	24,94	25,76	32,51	39,00
48,00	6,93	25,04	20,80	23,73	25,15	23,94	26,40	27,53	28,36	34,28	40,18
72,00	8,49	25,16	20,91	24,31	25,56	24,10	26,89	28,01	28,73	34,78	40,89
96,00	9,80	25,33	21,05	24,36	25,79	24,20	27,04	28,22	28,98	35,03	41,27
120,00	10,95	25,46	21,09	24,42	25,86	24,22	27,06	28,36	28,99	35,12	41,49
144,00	12,00	25,57	21,11	24,43	25,88	24,23	27,08	28,37	28,99	35,14	41,63
168,00	12,96	25,78	21,13	24,44	25,89	24,23	27,09	28,38	29,00	35,16	41,64

Anexo 52. Resultados de los Ensayos de Absorción

Tipo de Mortero	Resist. Penetración del agua $m(10^7)$	Coefficiente Absorción Capilar k ($kg/m^2 s^{1/2}$)	Porosidad E (%)	Absortividad S ($mm/horas^{1/2}$)
Normal	1,505	0,047	18,154	15,464
R-30 10%	11,664	0,008	8,779	5,556
R-30 20%	11,236	0,010	10,261	5,660
R-30 30%	10,816	0,011	11,776	5,769
R-50 10%	13,456	0,009	10,307	5,172
R-50 20%	12,544	0,011	11,921	5,357
R-50 30%	11,664	0,010	11,265	5,556
R-100 10%	15,376	0,010	12,937	4,839
R-100 20%	14,400	0,012	14,766	5,000
R-100 30%	13,924	0,017	16,253	5,085

TABLA RESULTADOS DEL ENSAYO SOLIDEZ BAJO LA ACCION DE SULFATOS

Anexo 53. Valores de Desgaste bajo la acción de Sulfatos

Probeta		Peso Inicial (gr)	Peso (gr) 7 Ciclos	Desgaste 7 Ciclos (% Peso)	Prom. Desgaste 7 Ciclos (% Peso)
Normal	1	288,11	261,27	9,316	9,161
	2	283,34	257,82	9,007	
R-30 10%	1	243,57	223,94	8,059	8,266
	2	240,66	220,27	8,473	
R-30 20%	1	244,03	226,23	7,294	7,496
	2	230,69	212,93	7,699	
R-30 30%	1	237,40	231,67	2,414	2,571
	2	230,98	224,68	2,728	
R-50 10%	1	228,09	201,14	11,816	11,294
	2	245,05	218,65	10,773	
R-5020%	1	206,73	183,75	11,116	10,620
	2	236,15	212,24	10,125	
R-50 30%	1	222,23	204,69	7,893	7,763
	2	224,30	207,18	7,633	
R-100 10%	1	227,87	170,81	25,041	24,678
	2	245,90	186,11	24,315	
R-100 20%	1	248,00	194,41	21,609	22,225
	2	236,42	182,42	22,841	
R-100 30%	1	217,18	174,30	19,744	19,314
	2	228,50	185,35	18,884	

TABLA DE RESULTADOS PARA EL ENSAYO AL IÓN CLORURO

Anexo 54. Concentraciones de Cloruros para los Morteros

TIEMPO	CONCENTRACION (mg./Litros)									
	NORMAL	R-30 10%	R-30 20%	R-30 30%	R-50 10%	R-50 20%	R-50 30%	R-100 10%	R-100 20%	R-100 30%
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	146	60	48	76	59	88	97	79	100	153
4	263	120	104	110	118	157	180	127	163	226
6	390	172	160	211	168	203	276	174	188	318
8	468	240	200	295	252	290	371	232	251	98
10	488	292	256	337	336	385	451	289	326	410
12	634	343	320	380	420	470	498	346	414	483
14	731	360	400	506	462	499	578	385	477	556
16	800	386	400	590	504	550	657	452	540	630
18	878	420	424	675	546	607	752	538	570	685
20	926	463	480	759	630	670	791	566	616	758
22	975	498	560	843	697	740	880	585	678	831
24	1170	515	584	886	756	786	911	633	742	886
26	1268	558	624	928	839	858	975	700	792	960
28	1297	644	720	970	881	904	1039	776	867	1015
30	1355	721	768	1012	923	950	1102	824	903	1088
32	1424	746	824	1054	949	991	1182	882	943	1179
34	1580	815	881	1096	974	1021	1229	939	993	1216
36	1755	849	961	1155	1007	1103	1293	1015	1056	1308
38	1872	918	1017	1214	1091	1134	1356	1092	1144	1363
40	1950	935	1065	1257	1175	1206	1420	1159	1232	1399
42	2048	944	1121	1349	1259	1282	1499	1254	1295	1473
44	2184	961	1169	1434	1343	1354	1563	1273	1358	1546
46	2243	1012	1265	1518	1427	1426	1627	1311	1408	1638
48	2408	1055	1337	1602	1511	1497	1690	1378		
50	2438	1158	1385	1645	1553	1543	1754	1445	1546	1748
52	2535	1201	1441	1704	1595	1595	1833	1541	1609	1803
54	2681	1296	1489	1754	1637	1646	1913	1589	1659	1858
56	2730	1373	1537	1855	1679	1692	1976	1636	1722	1913
58	2750	1416	1577	1965	1721	1738	2040	1684	1785	1986
60	2925	1519	1649	2024	1763	1830	2087	1732	1873	2059
62	2954	1570	1721	2083	1805	1902	2151	1799	1936	2114
64	3169	1604	1809	2151	1847	1963	2230	1866	1999	2169
66	3218	1665	1873	2193	1889	2055	2310	1923	2049	2224
68	3364	1707	1913	2243	1931	2107	2358	1990	2137	2298
70	3413	1759	1961	2319	1973	2158	2389	2047	2213	2371
72	3510	1802	2009	2387	2015	2209	2437	2114	2301	2444

Anexo 55. Valores de Flujo Iónico y Coeficiente de Difusión

Muestra	J (eq. / L*S)	Deff (10 ^ -12) (m^2/s)
Normal	2,30E-07	0,100
R-30 10%	1,07E-07	0,072
R-30 20%	1,16E-07	0,078
R-30 30%	1,31E-07	0,089
R-50 10%	1,31E-07	0,089
R-50 20%	1,37E-07	0,092
R-50 30%	1,44E-07	0,098
R-100 10%	1,39E-07	0,094
R-100 20%	1,47E-07	0,099
R-100 30%	1,57E-07	0,106

Anexo 56. Valores de Permeabilidad al Ion Cloruro

Tipo de Mortero	Permeabilidad al Ión Cloruro (mA)	Porcentaje Disminución
NORMAL	2929,12	0,00
R-30 10%	1236,25	-57,79
R-30 20%	1356,21	-53,70
R-30 30%	1398,49	-52,26
R-50 10%	1350,21	-53,90
R-50 20%	1712,33	-41,54
R-50 30%	1899,66	-35,15
R-100 10%	1389,26	-52,57
R-100 20%	1786,33	-39,01
R-100 30%	1987,26	-32,16

