

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

# **UTILIZACIÓN DE RESIDUOS PÉTREOS DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN PROCESADOS COMO AGREGADOS EN MEZCLAS DE CONCRETO.**

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por los Brs. Guardia H., Ricardo A.,  
Soto P, María A.  
Para optar al Título de  
Ingeniero Civil

Caracas, 2008

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

# **UTILIZACIÓN DE RESIDUOS PÉTREOS DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN PROCESADOS COMO AGREGADOS EN MEZCLAS DE CONCRETO.**

TUTOR ACADÉMICO: Ing. César Peñuela.

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por los Brs. Guardia H., Ricardo A.,  
Soto P, María A.  
Para optar al Título de  
Ingeniero Civil

Caracas, 2008

**ACTA**

El día Viernes 21/11 se reunió el jurado formado por los profesores:

César Peñuela  
Trino Balboa  
Ma. Eugenia Knody

Con el fin de examinar el Trabajo Especial de Grado titulado: **“Utilización de residuos pétreos de materiales de construcción procesados como agregados en mezclas de concreto”**.

Presentado ante la Ilustre Universidad Central de Venezuela para optar al Título de **INGENIERO CIVIL**.

Una vez oída la defensa oral que los bachilleres hicieron de su Trabajo Especial de Grado, este jurado decidió las siguientes calificaciones:

| NOMBRE                   | CALIFICACIÓN |        |
|--------------------------|--------------|--------|
|                          | Números      | Letras |
| Br. María Alejandra Soto | 20           | VEINTE |
| Br. Ricardo Guardia      | 20           | VEINTE |

Recomendaciones:

~~\_\_\_\_\_~~  
~~\_\_\_\_\_~~  
~~\_\_\_\_\_~~

**FIRMAS DEL JURADO**

[Firma]  
[Firma]  
Ma. Eugenia Knody

Caracas, 21 de 11 de 2008

## DEDICATORIA

Primero que nada, dedico este Trabajo Especial de Grado a Dios por darme la salud y la oportunidad de haber estado aprendiendo en la Ilustre U.C.V. A mis padres Amelia y Rogelio por haberme criado como lo hicieron y por estar conmigo en cualquier instante apoyándome en todo aunque no siempre estén de acuerdo, por amarme sin condición alguna, gracias por haber hecho que yo hoy sea quien soy. A mi hermana Aga, por ser mi hermana mayor y mi ejemplo a seguir, al igual que mi cuñado Gugui. A mi amor Maralba, por ser mi fuente de inspiración en todo lo que hago, sin ti todo sería vacío, gracias por amarme como lo haces y por estar conmigo siempre. A mi querida U.C.V. por haberme formado y por haberme enseñado todo lo que se, extrañaré mucho los momentos en sus instalaciones, espero retribuir los conocimientos adquiridos de alguna manera algún día.

Ricardo.

Este Trabajo Especial de Grado se lo dedico a la persona que siempre ha sido fuente de inspiración para conseguir todo lo que pueda proponerme, esta persona es mi papá. Además, a la Universidad Central de Venezuela por darme una formación profesional integral y una calidad humana única.

M<sup>a</sup> Alejandra

## **AGRADECIMIENTOS**

A nuestro tutor, el Ingeniero y Profesor César Peñuela por su gran ayuda durante toda la realización de este Trabajo Especial de Grado. A la profesora María Itriago por su aporte en cuanto a la redacción lógica del Trabajo Especial de Grado.

A nuestros padres y madres por todo el apoyo brindado durante toda la realización de este trabajo.

Al Ingeniero José Luis Soto, por haber aportado la idea de realización de este tema de investigación, y a su vez por contribuir en el desarrollo de todo el trabajo.

Al personal técnico del I.M.M.E., en especial a Lee Yanez, René Aguilera, Elione Barrios y Juan Burgos, por la paciencia y la ayuda prestada en la realización de los ensayos necesarios para el trabajo.

A todos los amigos que de alguna u otra manera colaboraron con nosotros, “son muchos y no se pueden nombrar todos”, los queremos!!.

A la empresa Yanes Ingenieros Constructores C.A., por la colaboración prestada, por los conocimientos impartidos y por el suministro de los residuos pétreos de materiales de construcción procesados utilizados en este trabajo de investigación.

Nos agradecemos a nosotros mismos por la paciencia mutua.

## **RESUMEN**

**Guardia H., Ricardo A.  
Soto P., María A.**

### **UTILIZACIÓN DE RESIDUOS PÉTREOS DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN PROCESADOS COMO AGREGADOS EN MEZCLAS DE CONCRETO.**

**Tutor Académico: Prof. César Peñuela.  
Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Civil.  
2008. 181 páginas**

**Palabras claves:** Concreto, Diseño de mezcla, Residuos Pétreos de Material de Construcción, Reciclaje

En una obra civil, durante su ejecución o de demolición, se generan residuos pétreos de material de construcción o los comúnmente llamados escombros, que a su vez generan costos debido a que requieren un proceso de bote. Una forma de reducir los costos del bote de los residuos pétreos de materiales de construcción, es la utilización de los mismos como agregados para producir concreto, luego de haber sido debidamente procesados. A su vez, es importante resaltar que al utilizar dichos residuos se participa en un proceso de reciclaje, contribuyendo de alguna forma con la conservación del medio ambiente.

El presente trabajo se realiza con el fin de evaluar las características químicas y físico-mecánicas de residuos pétreos de materiales de construcción (RPMC) procesados, como agregados en mezclas de concreto que cumplan los parámetros generalmente requeridos para elementos no estructurales y a menor costo de producción que el generado utilizando materiales convencionales. Los elementos no estructurales, son considerados en este Trabajo Especial de Grado,



como elementos sometidos a solicitaciones menores a las soportadas por elementos estructurales principales como: columnas, vigas, losas, fundaciones, entre otros.

La evaluación se hace mediante diversos ensayos de laboratorio que permiten una estimación del comportamiento de los agregados compuestos por residuos pétreos de materiales de construcción, y a su vez de mezclas de concreto realizadas con dichos agregados. Los ensayos realizados a los agregados residuales y al concreto elaborado en este Trabajo de Investigación, están basados en las Normas COVENIN.

Los agregados estudiados provienen de dos tipos de materiales residuales de origen, los agregados Tipo I están compuestos por materiales de elementos de mampostería y concreto, y los Tipo II de sólo elementos de concreto. Las características de los residuos pétreos de materiales de construcción resultaron aceptables en la mayoría de los ensayos, al compararse con los valores normativos ó usuales de agregados convencionales utilizados en mezclas de concreto. Además, las mezclas de concreto elaboradas con agregados Tipo II presentan un buen comportamiento, alcanzando aproximadamente los valores de diseño de resistencia a la compresión (210, 250 y 280 kgf/cm<sup>2</sup>), mientras que las mezclas con agregados Tipo I presentan comportamientos adecuados hasta el valor medio de las resistencias estudiadas.

Por otra parte, se contrasta el costo que implica la elaboración de mezclas de concreto con agregados de residuos pétreos de materiales de construcción, respecto al costo de mezclas elaboradas con agregados convencionales, resultando que la utilización de agregados residuales ofrece ventajas ambientales y económicas.

## TABLA DE CONTENIDO

|   |      |
|---|------|
| ACTA.....   | III  |
| DEDICATORIA.....  | IV   |
| AGRADECIMIENTOS .....   | V    |
| RESUMEN .....   | VI   |
| TABLA DE CONTENIDO.....   | VIII |
| LISTA DE TABLAS.....  | XII  |
| LISTA DE GRÁFICOS, FOTOS Y FIGURAS .....  | XVI  |
| INTRODUCCIÓN .....  | 1    |
| CAPÍTULO I .....  | 3    |
| TEMA DE INVESTIGACIÓN .....   | 3    |
| 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....   | 3    |
| 1.2. OBJETIVOS.....   | 5    |
| 1.2.1. Objetivo General .....   | 5    |
| 1.2.2. Objetivos Específicos.....   | 5    |
| 1.3. APORTES.....   | 7    |
| CAPÍTULO II .....   | 9    |
| MARCO TEÓRICO.....  | 9    |
| 2.1. LOS RESIDUOS DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN EN OBRAS CIVILES .....                  | 9    |
| 2.2. REFERENCIAS DE RECICLAJE DE RESIDUOS PÉTREOS EN OTROS PAÍSES .....                 | 10   |
| 2.3. MEZCLA DE CONCRETO .....   | 14   |
| 2.4. COMPONENTES PARA MEZCLAS DE CONCRETO .....   | 15   |
| 2.5. INSTALACIONES, MAQUINARIA Y TÉCNICAS UTILIZADAS PARA EL PROCESADO DE LOS RMC ..... | 18   |



|  |    |
|--|----|
| 2.6. IMPACTO AMBIENTAL GENERADO POR LA INADECUADA DISPOSICIÓN DE LOS RMC   | 22 |
| 2.7. REFERENCIAS DE RECICLAJE DE RMC EN VENEZUELA.....   | 24 |
| 2.7.1. Empresa Yanes Ingenieros Constructores.....   | 24 |
| 2.7.2. Trabajo Especial de Grado de la sobre el Reciclaje del Ladrillo de Desecho como Agregado para el Concreto, 1987 .....   | 26 |
| 2.8. USO DE RESIDUOS PÉTREOS DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN (RPMC) PROCESADOS EN MEZCLAS DE CONCRETO .....  | 28 |
| 2.9. DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO.....   | 30 |
| 2.10. CONTRASTE DEL COSTO DE OBTENCIÓN DE LOS COMPONENTES DE LAS MEZCLAS .....   | 30 |
| CAPÍTULO III .....   | 31 |
| MÉTODO.....  | 31 |
| 3.1. ASPECTOS GENERALES .....  | 31 |
| 3.2. METODOLOGÍA DE TRABAJO.....   | 32 |
| 3.2.1. Obtención del residuo pétreo de materiales de construcción.....   | 32 |
| 3.2.2. Reducción de tamaño del residuo pétreo de materiales de construcción .....  | 35 |
| 3.2.3. Diseño de mezcla de concreto .....  | 37 |
| 3.2.4. Ensayos .....   | 38 |
| 3.2.5. Características de las probetas para los ensayos.....   | 45 |
| 3.2.6. Ensayos a probetas de mezclas diseñadas .....   | 46 |
| 3.2.7. Cálculo del costo de los componentes de mezclas de concreto diseñadas con agregados reciclados y con agregados convencionales, utilizando una gráfica referida a la Ley de Abrams ..... | 47 |
| 3.2.8. Contraste de los costos de elaboración de las mezclas de concreto ...   | 48 |
| CAPÍTULO IV.....   | 49 |
| RESULTADOS Y ANÁLISIS.....   | 49 |

|  |    |
|--|----|
| 4.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS RESIDUOS PÉTREOS DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.....  | 49 |
| 4.2. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS APLICADOS A LOS RESIDUOS PÉTREOS DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN PROCESADOS.....           | 53 |
| 4.2.1. Granulometría .....   | 54 |
| 4.2.2. Peso específico y absorción.....  | 63 |
| 4.2.2.1. Peso específico .....   | 63 |
| 4.2.2.2. Absorción .....   | 66 |
| 4.2.3. Contenido de partículas menores de 74 micras .....  | 67 |
| 4.2.4. Contenido de partículas menores de 20 micras .....  | 69 |
| 4.2.5. Contenido de impurezas orgánicas .....  | 70 |
| 4.2.6. Peso unitario .....   | 71 |
| 4.2.6.1. Peso unitario suelto.....   | 71 |
| 4.2.6.2. Peso unitario compacto.....   | 72 |
| 4.2.7. Contenido de vacíos en el agregado.....   | 72 |
| 4.2.7.1. Contenido de vacíos en el agregado suelto.....  | 73 |
| 4.2.7.2. Contenido de vacíos en el agregado compacto.....  | 73 |
| 4.2.8. Resistencia al desgaste .....   | 74 |
| 4.2.9. Contenido de cloruros y sulfatos .....  | 75 |
| 4.2.10. Contenido de humedad .....   | 77 |
| 4.3. RESULTADOS Y ANÁLISIS APLICADOS A LAS MEZCLAS DE CONCRETO ELABORADAS CON RESIDUOS PÉTREOS DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN ..... | 77 |
| 4.3.1. Diseños de mezcla .....   | 77 |
| 4.3.1.1. Cálculo tipo de un diseño de mezcla de concreto .....   | 77 |
| 4.3.1.2. Resultados de las mezclas diseñadas .....   | 84 |
| 4.3.2. Preparación de las mezclas de concreto diseñadas .....  | 88 |
| 4.3.3. Asentamiento .....  | 91 |
| 4.3.4. Resistencia a la compresión simple .....  | 93 |
| 4.3.4.1. Características de las probetas ensayadas .....   | 93 |
| 4.3.4.2. Resultados y análisis del ensayo a compresión simple.....   | 98 |

|   |     |
|---|-----|
| 4.3.4.3. Criterios de aceptación ó rechazo de valores de resistencia obtenidos mediante los ensayos de compresión simple .....                            | 111 |
| 4.3.4.4. Diseños de mezcla en base a los resultados experimentales de resistencia la compresión. Cálculo del costo de las mezclas según dosificación..... | 114 |
| 4.3.4.5. Contraste del costo de elaboración de mezclas con los diferentes tipos de agregados.....   | 118 |
| 4.3.5. Resistencia a la Tracción indirecta.....   | 119 |
| 4.3.5.1. Características de las probetas ensayadas .....  | 120 |
| 4.3.5.2. Resultados y análisis del ensayo de resistencia a la tracción indirecta .....  | 123 |
| 4.3.6. Velocidad de propagación de ondas .....  | 131 |
| 4.3.7. Módulo de elasticidad secante .....  | 135 |
| 4.3.7.1. Características de las probetas ensayadas .....  | 136 |
| 4.3.7.2. Resultados y análisis del ensayo de módulo de elasticidad secante .....  | 138 |
| 4.3.7.3. Comparación de valores de módulo de elasticidad obtenidos teóricamente y de la aplicación del ensayo .....                                       | 150 |
| CONCLUSIONES.....   | 152 |
| RECOMENDACIONES .....   | 157 |
| REFERENCIAS.....  | 159 |

## LISTA DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| TABLA 2.1: CANTIDADES APROXIMADAS DE RESIDUOS DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN,<br>A LO LARGO DE 1990, EXCLUYENDO LA TIERRA Y EL ASFALTO  | 11 |
| TABLA 2.2: CÁLCULO APROXIMADO DE LA PRODUCCIÓN DE CONCRETO PARA EL AÑO 2000,<br>BASADO EN TRES ESTIMACIONES DE CONSUMO POR HABITANTE, CON UNA POBLACIÓN<br>DE 6.000 MILLONES | 12 |
| TABLA 2.3: EJEMPLO DE LAS POSIBILIDADES DE REUTILIZACIÓN DE LOS FRAGMENTOS DE<br>LADRILLO Y CONCRETO   | 13 |
| TABLA 3.1: ENSAYOS A APLICAR A LOS RESIDUOS PÉTREOS PROCESADOS   | 39 |
| TABLA 3.2: ENSAYOS A APLICAR A LAS MEZCLAS DE CONCRETO   | 44 |
| TABLA 3.3: ENSAYOS A PROBETAS DE UNA MEZCLA DISEÑADA   | 46 |
| TABLA 4.1: RESULTADOS DEL ENSAYO DE GRANULOMETRÍA DEL AGREGADO FINO TIPO I   | 54 |
| TABLA 4.2: RESULTADOS DEL ENSAYO DE GRANULOMETRÍA DEL AGREGADO GRUESO TIPO<br>I  | 55 |
| TABLA 4.3: RESULTADOS DEL ENSAYO DE GRANULOMETRÍA DEL AGREGADO FINO TIPO II  | 56 |
| TABLA 4.4: RESULTADOS DEL ENSAYO DE GRANULOMETRÍA DEL AGREGADO GRUESO TIPO<br>II   | 57 |
| TABLA 4.5: RESULTADOS DEL ENSAYO DE GRANULOMETRÍA DEL AGREGADO COMBINADO<br>TIPO I   | 59 |
| TABLA 4.6: RESULTADOS DEL ENSAYO DE GRANULOMETRÍA DEL AGREGADO COMBINADO<br>TIPO II  | 60 |
| TABLA 4.7: RESULTADOS DEL ENSAYO DE PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO<br>FINO   | 63 |
| TABLA 4.8: RESULTADOS DEL ENSAYO DE PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO<br>GRUESO   | 64 |

|   |    |
|---|----|
| TABLA 4.9: RESULTADOS DE PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO COMBINADO   | 64 |
| TABLA 4.10: RESULTADOS DEL ENSAYO DE CONTENIDO DE PARTÍCULAS MENORES DE 74 MICRAS EN EL AGREGADO COMBINADO  | 67 |
| TABLA 4.11: RESULTADOS DEL ENSAYO DE CONTENIDO DE PARTÍCULAS MENORES DE 20 MICRAS EN EL AGREGADO FINO   | 69 |
| TABLA 4.12: RESULTADOS DEL ENSAYO DE CONTENIDO DE IMPUREZAS ORGÁNICAS EN EL AGREGADO FINO   | 70 |
| TABLA 4.13: RESULTADOS DEL ENSAYO DE PESO UNITARIO DEL AGREGADO COMBINADO   | 71 |
| TABLA 4.14: RESULTADOS DEL ENSAYO DE CONTENIDO DE VACÍOS EN EL AGREGADO COMBINADO   | 73 |
| TABLA 4.15: RESULTADOS DEL ENSAYO DE RESISTENCIA AL DESGASTE DEL AGREGADO GRUESO  | 74 |
| TABLA 4.16: RESULTADOS DEL ENSAYO DE CONTENIDO DE CLORUROS Y SULFATOS EN EL AGREGADO FINO   | 75 |
| TABLA 4.17: CONTENIDO DE CLORUROS Y SULFATOS EN EL AGUA COMÚN   | 75 |
| TABLA 4.18: RESULTADOS DEL ENSAYO DE CONTENIDO DE HUMEDAD EN EL AGREGADO COMBINADO  | 77 |
| TABLA 4.19: CONTENIDO DE HUMEDAD Y ABSORCIÓN DE LOS AGREGADOS   | 84 |
| TABLA 4.20: DOSIFICACIÓN DE MEZCLAS DE CONCRETO DISEÑADAS   | 85 |
| TABLA 4.21: VOLUMEN DE LAS MEZCLAS PREPARADAS   | 90 |
| TABLA 4.22: DISTRIBUCIÓN DE LAS PROBETAS CILÍNDRICAS PARA LOS ENSAYOS DE UNA MEZCLA DE RESISTENCIA DE DISEÑO DE 210 KGF/CM <sup>2</sup> , POR ESCASEZ DE MEZCLA | 91 |
| TABLA 4.23: RESULTADOS DEL ENSAYO DE ASENTAMIENTO   | 91 |
| TABLA 4.24: CARACTERÍSTICAS DE LAS PROBETAS DE CONCRETO ENSAYADAS A COMPRESIÓN  | 94 |
| TABLA 4.25: RESULTADOS OBTENIDOS DE ENSAYOS DE COMPRESIÓN SIMPLE A CILINDROS CON AGREGADOS TIPO I.  | 98 |

|   |     |
|---|-----|
| TABLA 4.26: RESULTADOS OBTENIDOS DE ENSAYOS DE COMPRESIÓN SIMPLE A CILINDROS CON AGREGADOS TIPO II                              | 101 |
| TABLA 4.27: VALORES DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (ESTIMADOS Y OBTENIDOS)  | 106 |
| TABLA 4.28: RELACIÓN AGUA/CEMENTO DE DISEÑO Y RESULTADOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN A LA EDAD DE 7 Y 28 DÍAS                | 108 |
| TABLA 4.29: PORCENTAJE DE LAS RESISTENCIAS ALCANZADAS A LA EDAD DE 7 Y 28 DÍAS  | 109 |
| TABLA 4.30: CRITERIO N°1 DE ACEPTACIÓN Y RECHAZO DE LOS VALORES OBTENIDOS DE RESISTENCIA DE LAS MUESTRAS ENSAYADAS A COMPRESIÓN | 112 |
| TABLA 4.31: CRITERIO N°2 DE ACEPTACIÓN Y RECHAZO DE LOS VALORES OBTENIDOS DE RESISTENCIA DE LAS MUESTRAS ENSAYADAS A COMPRESIÓN | 113 |
| TABLA 4.32: COSTO UNITARIO DE LOS COMPONENTES DE UNA MEZCLA DE CONCRETO   | 115 |
| TABLAS 4.33: DOSIFICACIÓN Y COSTO DE LAS MEZCLAS DISEÑADAS  | 115 |
| TABLA 4.34: CARACTERÍSTICAS DE LAS PROBETAS DE CONCRETO ENSAYADAS A TRACCIÓN  | 120 |
| TABLA 4.35: RESULTADOS OBTENIDOS DE ENSAYOS DE TRACCIÓN INDIRECTA A CILINDROS CON AGREGADOS TIPO I.                             | 123 |
| TABLA 4.36: RESULTADOS OBTENIDOS DE ENSAYOS DE TRACCIÓN INDIRECTA A CILINDROS CON AGREGADOS TIPO II.                            | 126 |
| TABLA 4.37: VALORES DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN (ESTIMADOS Y OBTENIDOS)  | 130 |
| TABLA 4.38: RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE ONDAS REALIZADOS A CILINDROS CON AGREGADOS TIPO I          | 131 |
| TABLA 4.39: RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE ONDAS REALIZADOS A CILINDROS CON AGREGADOS TIPO II         | 132 |
| TABLA 4.40: CONDICIONES GENERALES DEL CONCRETO SEGÚN VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO   | 133 |



|   |     |
|---|-----|
| TABLA 4.41: CARACTERÍSTICAS DE LAS PROBETAS ENSAYADAS   | 136 |
| TABLA 4.42: CARGA MÁXIMA APLICADA EN LOS ENSAYOS DE MÓDULO DE ELASTICIDAD A CILINDROS CON AGREGADOS TIPO I                        | 138 |
| TABLA 4.43: RESULTADOS OBTENIDOS DE ENSAYOS DE MÓDULO DE ELASTICIDAD A CILINDROS CON AGREGADOS TIPO I, $FC=210 \text{ KGF/CM}^2$  | 138 |
| TABLA 4.44: RESULTADOS OBTENIDOS DE ENSAYOS DE MÓDULO DE ELASTICIDAD A CILINDROS CON AGREGADOS TIPO I, $FC=250 \text{ KGF/CM}^2$  | 140 |
| TABLA 4.45: RESULTADOS OBTENIDOS DE ENSAYOS DE MÓDULO DE ELASTICIDAD A CILINDROS CON AGREGADOS TIPO I, $FC=280 \text{ KGF/CM}^2$  | 142 |
| TABLA 4.46: CARGA MÁXIMA APLICADA EN LOS ENSAYOS DE MÓDULO DE ELASTICIDAD A CILINDROS CON AGREGADOS TIPO II                       | 144 |
| TABLA 4.47: RESULTADOS OBTENIDOS DE ENSAYOS DE MÓDULO DE ELASTICIDAD A CILINDROS CON AGREGADOS TIPO II, $FC=210 \text{ KGF/CM}^2$ | 144 |
| TABLA 4.48: RESULTADOS OBTENIDOS DE ENSAYOS DE MÓDULO DE ELASTICIDAD A CILINDROS CON AGREGADOS TIPO II, $FC=250 \text{ KGF/CM}^2$ | 146 |
| TABLA 4.49: RESULTADOS OBTENIDOS DE ENSAYOS DE MÓDULO DE ELASTICIDAD A CILINDROS CON AGREGADOS TIPO II, $FC=280 \text{ KGF/CM}^2$ | 148 |
| TABLA 4.50: MÓDULO DE ELASTICIDAD SECANTE OBTENIDO TEÓRICAMENTE DE MEZCLAS DE CONCRETO CON DIFERENTES TIPOS DE AGREGADOS          | 150 |
| TABLA 4.51: MÓDULO DE ELASTICIDAD SECANTE OBTENIDO DE LA APLICACIÓN DEL ENSAYO  |     |

## LISTA DE GRÁFICOS, FOTOS Y FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| FOTO N°1: ILUSTRACIÓN DE LA MAQUINARIA RUBBLE MASTER RM-80, RECIBIENDO RESIDUOS DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN                   | 20 |
| FOTO N°2: ILUSTRACIÓN DE LA MAQUINARIA RUBBLE MASTER RM-80  | 21 |
| FOTO N°3: ILUSTRACIÓN DE UNA DEMOLICIÓN SELECTIVA, CLASIFICACIÓN DE LOS ELEMENTOS NO FIJOS                                      | 33 |
| FOTO N°4: ILUSTRACIÓN CLASIFICACIÓN DE LOS ELEMENTOS GRANDES DE ACERO Y OTROS ELEMENTOS   | 34 |
| FOTO N°5: ILUSTRACIÓN DE LOS GRUPOS DE PARTÍCULAS QUE SEPARA LA CRIBADORA: GRUESAS Y FINAS                                      | 36 |
| FIGURA N°1: DIFERENTES CONTENIDOS DE AGUA QUE PUEDE PRESENTAR UNA PARTÍCULA   | 41 |
| FOTO N°6: ILUSTRACIÓN DEL ALMACENAMIENTO EN PILAS DE LOS RESIDUOS PÉTREOS DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN PROCESADOS              | 50 |
| FOTO N°7: ILUSTRACIÓN DEL CUARTEO DE AGREGADOS TIPO I   | 51 |
| FOTO N°8: ILUSTRACIÓN DEL AGREGADO GRUESO TIPO II   | 52 |
| FOTO N°9: ILUSTRACIÓN DEL AGREGADO GRUESO TIPO I  | 53 |
| GRÁFICO N°1: CURVA GRANULOMÉTRICA DEL AGREGADO FINO TIPO I  | 55 |
| GRÁFICO N°2: CURVA GRANULOMÉTRICA DEL AGREGADO GRUESO TIPO I  | 56 |
| GRÁFICO N°3: CURVA GRANULOMÉTRICA DEL AGREGADO FINO TIPO II   | 57 |
| GRÁFICO N°4: CURVA GRANULOMÉTRICA DEL AGREGADO GRUESO TIPO II   | 58 |
| GRÁFICO N°6: CURVA GRANULOMÉTRICA DEL AGREGADO COMBINADO TIPO II  | 61 |
| FÓRMULA N°1: CÁLCULO DE LA DENSIDAD Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO   | 63 |
| FÓRMULA N°2: CÁLCULO DE LA DENSIDAD Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO   | 63 |
| FÓRMULA N°3: CÁLCULO DEL CONTENIDO DE VACÍOS EN EL AGREGADO COMBINADO   | 72 |
| FOTO N°10: ILUSTRACIÓN DE LA DOSIFICACIÓN DE AGREGADOS Y CEMENTO DE LA MEZCLA DE 210 KGF/CM <sup>2</sup> , CON AGREGADOS TIPO I | 88 |

|   |     |
|---|-----|
| FOTO N°11: ILUSTRACIÓN DE LA DOSIFICACIÓN DE AGREGADOS Y CEMENTO DE LA MEZCLA DE 280 KGF/CM <sup>2</sup> , CON AGREGADOS TIPO II  | 89  |
| FOTO N°12: ILUSTRACIÓN DE PROBETAS CILÍNDRICAS DE LA MEZCLA DE RESISTENCIA DE 250 KGF/CM <sup>2</sup> , CON AGREGADOS TIPO II   | 90  |
| FOTO N°13: ILUSTRACIÓN DEL ENSAYO DE LA COLOCACIÓN DE LAS PROBETAS CILÍNDRICAS PARA REALIZAR EL ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE  | 93  |
| FOTO N°14: ILUSTRACIÓN DE LAS PROBETAS DE LA MEZCLA DE RESISTENCIA DE DISEÑO FC= 280 KGF/CM <sup>2</sup> , CON AGREGADOS TIPO II, EDAD DE ENSAYO A LOS 28 DÍAS  | 93  |
| FIGURA N°2: FORMAS DE FALLA CARACTERÍSTICAS EN ENSAYOS A COMPRESIÓN DE CILINDROS DE CONCRETO  | 97  |
| FOTO N°15: ILUSTRACIÓN DE UNA PROBETA ENSAYADA A COMPRESIÓN, DE LA MEZCLA DE RESISTENCIA DE DISEÑO DE 210 KGF/CM <sup>2</sup> , A LA EDAD DE ENSAYO DE 28 DÍAS, CON AGREGADO TIPO I. EL CILINDRO PRESENTÓ UNA FALLA DE TIPO (4), VER FIGURA N°2 | 104 |
| FOTO N°16: ILUSTRACIÓN DE UNA PROBETA ENSAYADA A COMPRESIÓN, DE LA MEZCLA DE RESISTENCIA DE DISEÑO DE 250 KGF/CM <sup>2</sup> , A LA EDAD DE 7 DÍAS, CON AGREGADOS TIPO II. EL CILINDRO PRESENTÓ UNA FALLA DE TIPO (2), VER FIGURA N°2          | 105 |
| FOTO N°17: ILUSTRACIÓN DE UNA PROBETA ENSAYADA A COMPRESIÓN, DE LA MEZCLA DE RESISTENCIA DE DISEÑO DE 280 KGF/CM <sup>2</sup> , A LA EDAD DE 28 DÍAS, CON AGREGADOS TIPO II. EL CILINDRO PRESENTÓ UNA FALLA DE TIPO (1), VER FIGURA N°2         | 105 |
| FOTO N°18: ILUSTRACIÓN DE UNA PROBETA ENSAYADA A COMPRESIÓN, DE LA MEZCLA DE RESISTENCIA DE DISEÑO DE 280 KGF/CM <sup>2</sup> , A LA EDAD DE 7 DÍAS, CON AGREGADOS TIPO II. EL CILINDRO PRESENTÓ UNA FALLA DE TIPO (3), VER FIGURA N°2          | 106 |
| GRÁFICO N°7: RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN A LOS 7 DÍAS VS RELACIÓN AGUA/CEMENTO  | 110 |
| GRÁFICO N°8: RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN A LOS 28 DÍAS VS RELACIÓN AGUA/CEMENTO   | 111 |
| FOTO N°19: ILUSTRACIÓN DE LA COLOCACIÓN DE LAS PROBETAS CILÍNDRICAS PARA REALIZAR EL ENSAYO DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN INDIRECTA  | 119 |

|   |     |
|---|-----|
| FOTO N°20: ILUSTRACIÓN DE UNA PROBETA ENSAYADA A TRACCIÓN INDIRECTA, DE LA MEZCLA DE RESISTENCIA DE DISEÑO DE 250 KGF/CM <sup>2</sup> , A LA EDAD DE ENSAYO DE 7 DÍAS, CON AGREGADO TIPO I  | 129 |
| FOTO N°21: ILUSTRACIÓN DE UNA PROBETA ENSAYADA A TRACCIÓN INDIRECTA, DE LA MEZCLA DE RESISTENCIA DE DISEÑO DE 280 KGF/CM <sup>2</sup> , A LA EDAD DE ENSAYO DE 7 DÍAS, CON AGREGADO TIPO II | 129 |
| FÓRMULA N°4: ESFUERZO DE TRACCIÓN INDIRECTA   | 130 |
| FOTO N°22: ILUSTRACIÓN DE PROBETA PARA APLICAR EL ENSAYO DE MÓDULO DE ELASTICIDAD   | 135 |
| GRÁFICO N°9: MÓDULO DE ELASTICIDAD DE PROBETA N°1, FC=210 KGF/CM <sup>2</sup>   | 139 |
| GRÁFICO N°10: MÓDULO DE ELASTICIDAD DE PROBETA N°2, FC=210 KGF/CM <sup>2</sup>  | 139 |
| GRÁFICO N°11: MÓDULO DE ELASTICIDAD DE PROBETA N°1, FC=250 KGF/CM <sup>2</sup>  | 141 |
| GRÁFICO N°12: MÓDULO DE ELASTICIDAD DE PROBETA N°2, FC=250 KGF/CM <sup>2</sup>  | 141 |
| GRÁFICO N°13: MÓDULO DE ELASTICIDAD DE PROBETA N°1, FC=280 KGF/CM <sup>2</sup>  | 143 |
| GRÁFICO N°14: MÓDULO DE ELASTICIDAD DE PROBETA N°2, FC=280 KGF/CM <sup>2</sup>  | 143 |
| GRÁFICO N°15: MÓDULO DE ELASTICIDAD DE PROBETA N°1, FC=210 KGF/CM <sup>2</sup>  | 145 |
| GRÁFICO N°16: MÓDULO DE ELASTICIDAD DE PROBETA N°2, FC=210 KGF/CM <sup>2</sup>  | 145 |
| GRÁFICO N°17: MÓDULO DE ELASTICIDAD DE PROBETA N°1, FC=250 KGF/CM <sup>2</sup>  | 147 |
| GRÁFICO N°18: MÓDULO DE ELASTICIDAD DE PROBETA N°2, FC=250 KGF/CM <sup>2</sup>  | 147 |
| GRÁFICO N°19: MÓDULO DE ELASTICIDAD DE PROBETA N°1, FC=280 KGF/CM <sup>2</sup>  | 149 |
| GRÁFICO N°20: MÓDULO DE ELASTICIDAD DE PROBETA N°2, FC=280 KGF/CM <sup>2</sup>  | 149 |
| FÓRMULA N° 5: MÓDULO DE ELASTICIDAD PARA CONCRETOS CON PESO UNITARIO MENOR A 2300 KGF/M <sup>3</sup>  | 150 |

## INTRODUCCIÓN

En toda obra de construcción y/o demolición, el factor económico afecta directamente a las variables y el funcionamiento de la misma, sin embargo, el impacto ambiental que generan estas actividades es otro aspecto importante a considerar. Por estas razones, el presente Trabajo Especial de Grado está orientado a la utilización de los residuos pétreos de materiales de construcción, comúnmente llamados escombros, como agregados para realizar mezclas de concreto donde dichos residuos han sido previamente procesados hasta obtener un tamaño de partícula correspondiente a los agregados convencionales que componen el concreto. De esta manera, se reciclan los residuos, contribuyendo con la conservación del medio ambiente y reduciendo, en parte, los costos generados por el bote de los mismos.

Es de gran importancia la evaluación de las características químicas y físico-mecánicas de los residuos de materiales de construcción procesados, ya que luego de conocer sus características y propiedades, se podrían utilizar como agregados para mezclas de concreto. Estas mezclas de concreto utilizando como agregados a los residuos, deben cumplir con los parámetros requeridos para elementos no estructurales, para así obtener una proporción óptima de cemento, agua y agregados. Los elementos no estructurales, son considerados en este Trabajo Especial de Grado, como elementos sometidos a sollicitaciones menores a las soportadas por elementos estructurales principales como: columnas, vigas, losas, fundaciones, entre otros.

Realizando los ensayos pertinentes al concreto ya endurecido, se obtienen los valores de resistencia que posteriormente se comparan con los valores de

diseño, de esta manera se observa si el material cumple con los requerimientos necesarios.

El cálculo de los costos de la realización de una mezcla de concreto utilizando como agregados a los residuos pétreos de materiales de construcción, permitirá contrastar dichos costos con los generados realizando mezclas de concreto utilizando agregados convencionales.



## **CAPÍTULO I**

### **TEMA DE INVESTIGACIÓN**

#### **1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Durante la ejecución o demolición de una obra civil se generan grandes cantidades de residuos de materiales de construcción (RMC), éstos requieren de un proceso de bote en vertederos, el cual genera costos.

Se piensa que al utilizar residuos pétreos de materiales de construcción (RPMC) procesados como agregados para mezclas de concreto, se reducirían los costos generados por el bote de los mismos y por la compra de los materiales comúnmente utilizados, además de participar en el proceso de reciclaje de los residuos de materiales de construcción como se hace en otros países.

La mezcla de concreto comprende piedra, arena, cemento y agua. Se plantea la opción de utilizar los residuos pétreos de una obra en demolición como agregados para la mezcla de concreto, en sustitución de la piedra y la arena. Se trabajan dos tipos de agregado que se diferencian por su composición, producto de diferentes técnicas de demolición selectiva: demolición selectiva normal y demolición selectiva específica.

Se tienen algunas referencias de la aplicación del proceso de reciclaje de los residuos de materiales de construcción de obras civiles en algunos países. La Comunidad Europea y los Estados Unidos están llevando desde hace algunos años trabajos conjuntos, en los que se analiza la posibilidad económica y algunas

estrategias posibles para dar uso a estos materiales que se producen en las demoliciones y construcciones.

Se propone restringir esta investigación a mezclas de concreto generalmente utilizadas para elementos no estructurales. Se utilizan mezclas elaboradas con agregados reciclados, aplicando en un caso la técnica de demolición selectiva normal y en el otro la técnica de demolición selectiva específica.

En líneas generales, la investigación consiste en evaluar mezclas de concreto para el vaciado de diferentes elementos no estructurales, cuyos agregados estén compuestos por residuos pétreos procesados provenientes de diferentes técnicas de demolición selectiva, estableciendo en el diseño el valor del asentamiento y el valor de la resistencia a la compresión. Con los resultados experimentales de resistencia a la compresión y la relación agua/cemento utilizada en el diseño, se compara la dosificación de mezclas de concreto diseñadas utilizando agregados reciclados, con la dosificación de mezclas de concreto diseñadas con agregados convencionales. Además, se realizan los cálculos de los costos de la elaboración de las mezclas con RPMC respecto a los costos de elaboración de mezclas con agregados comerciales, con lo cual, se puede generar una opción para incentivar el uso de materiales reciclados en la construcción y contribuir en la conservación del ambiente.

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. Objetivo General**

Evaluar las características químicas y físico-mecánicas de residuos pétreos de materiales de construcción (RPMC) procesados, como agregados en mezclas de concreto que cumplan los parámetros generalmente requeridos para elementos no estructurales y a menor costo de producción que el generado utilizando materiales convencionales.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Establecer los valores de asentamiento y resistencia a la compresión, generalmente requeridos en mezclas de concreto para elementos no estructurales.
- Calcular la proporción óptima de cemento, agua y agregados de RPMC en las mezclas de concreto establecidas, con agregados provenientes de la aplicación de una técnica de demolición selectiva normal y una técnica de demolición selectiva específica.
- Presentar pruebas experimentales de la aplicación de ensayos a muestras preparadas con base en los diseños de mezcla óptimos previamente calculados.

- Calcular el costo que implica la elaboración de una mezcla preparada con agregados de RPMC, según la dosificación, y el costo de otra diseñada con agregados convencionales (piedra y arena), en base a los valores de resistencia a la compresión obtenidos experimentalmente de las muestras preparadas con RPMC.
- Contrastar el costo que implica la elaboración de las mezclas de concreto con agregados de RPMC, respecto al costo de las mezclas de concreto diseñadas con agregados convencionales.

### **1.3. APORTES**

Este Trabajo Especial de Grado tiene relevancia para la Escuela de Ingeniería Civil y para el Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (I.M.M.E.) de la Facultad de Ingeniería. Si las pruebas experimentales realizadas demuestran que los diseños de mezclas de concreto utilizando residuos de materiales de construcción como agregados, resultan ser más económicos y rentables que los elaborados a partir de agregados convencionales, el aporte consistirá en unos diseños de mezclas ya estipulados para posteriores trabajos; por el contrario, si los diseños de mezcla utilizando residuos de materiales de construcción como agregado resultan ser menos rentables que los diseños con agregados convencionales, lo más conveniente sería profundizar en la línea de investigación iniciada y en las aplicaciones posibles a otros elementos constructivos.

El Estado, debido a la prioridad de satisfacer las necesidades de las personas de bajos recursos, se ha dedicado a realizar construcciones que serán posteriormente la vivienda para dichas personas, de esta manera los diseños de mezcla presentados tienen su aporte, logrando que personas de bajos recursos tengan otra opción en materiales de construcción que les favorezca, incluso si las viviendas son realizadas por las mismas personas, ya que los costos de los agregados provenientes del reciclaje del material pétreo de construcción podrían resultar menores que los de los agregados comerciales.

En general, la Ingeniería se basa en la integración de conocimientos de diversas áreas. El presente Trabajo Especial de Grado tiene características importantes, las cuales son la optimización de costos, innovación de técnicas de construcción y contribución para técnicas de reciclaje que ayuden a la

conservación del medio ambiente, generando un aporte para los autores del trabajo, pues está ligado a su formación como ingenieros integrales.



## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Los residuos de materiales de construcción en obras civiles**

En toda obra de construcción civil, durante los procesos de ejecución o demolición de estructuras se genera una gran cantidad de residuos de materiales, que por lo general son botados en vertederos. Es posible aplicar alguna técnica de reciclaje que permita un mayor aprovechamiento de estos residuos.

La composición de los residuos pétreos es muy variada. En principio, para su reciclaje, los residuos pétreos deben separarse de las fracciones de plásticos, materia orgánica, papeles, entre otros. Están compuestos por elementos de diferentes tipos, tales como bloques de concreto, bloques de arcilla, sobrantes de mezclas de friso y concreto, en general, se puede decir que están compuestos por un 20% de concreto, un 50% de material de albañilería, un 10% de asfalto y un 20% de otros elementos. (Ambientum, 2003)

Según su origen, los residuos pétreos pueden presentar diferentes proporciones de elementos en su composición. Los RPMC se obtienen de las siguientes actividades:

- Demolición selectiva normal: el residuo pétreo se obtiene sin clasificación de los elementos de la edificación en la demolición.
- Demolición selectiva específica: los diferentes residuos pétreos se obtienen de la clasificación de los elementos de la edificación en: elementos

estructurales de concreto (columnas, vigas, losas, entre otros) y otros elementos (paredes, pisos).

- Construcción: el residuo pétreo generalmente no es clasificado.

Los RPMC que provienen de elementos estructurales de concreto contienen mayor cantidad de concreto que los provenientes de otros elementos, que además de presentar este material contienen fracciones de bloques, cerámicas y morteros.

Por lo general, los residuos de materiales de construcción (RMC) son botados en vertederos asignados para recibir estos materiales, no son procesados o reciclados para su aprovechamiento. El proceso de vertido de estos materiales implica un gasto en la carga a los camiones, el transporte y la recepción del material en el vertedero. Es importante considerar el costo del proceso ya que en una obra civil se genera un gran volumen de estos materiales, a su vez por su composición y volumen representan un factor muy contaminante del medio ambiente.

En Caracas, existen varios vertederos para RMC pero sólo el vertedero de La Bonanza está aprobado por el Ministerio del Poder Popular para el Ambiente para realizar esta actividad. Actualmente, este proceso de bote de RMC lo realizan compañías o particulares que tienen el vehículo y personal adecuado para la actividad, y el costo del bote de los RMC, que incluye transporte y vertido, es de aproximadamente 180 BsF/m<sup>3</sup>.

## **2.2. Referencias de reciclaje de residuos pétreos en otros países**

Los residuos de materiales de construcción provenientes de las acciones constructivas y las demoliciones son, en cuanto a su volumen, la mayor fuente de

residuos generados a nivel mundial, con respecto a otros residuos sólidos urbanos. Los grandes volúmenes de estos residuos generados por los Estados Unidos de Norteamérica son de 100 millones de toneladas por año. Los países que conforman la Comunidad Europea producen unos 200 millones de toneladas anuales de residuos de la construcción y de las demoliciones, lo que representa 550 kg por habitante y año. (Arq. Enrique Hernández Castillo, 2005). A continuación, se presenta una tabla con valores de producción de residuos de materiales de construcción de diferentes países:

Tabla 2.1: Cantidades aproximadas de residuos de materiales de construcción, a lo largo de 1990, excluyendo la tierra y el asfalto

| País         | Habitantes (en millones) | Producción de residuos de la construcción (Mill/Tm) | Promedio (kg/hab) |
|--------------|--------------------------|---|-------------------|
| Dinamarca    | 5                        | 5   | 100               |
| Holanda      | 15                       | 7   | 70                |
| Gran Bretaña | 57                       | 30-50   | 530-890           |
| Alemania     | 62                       | 28  | 450               |
| Bélgica      | 10                       | 7   | 70                |
| España       | 39                       | 11  | 280               |
| Total        | 188                      | 88-108  | 470-570           |

Fuente: COWIconsult, 1990

Puede calcularse que la media global de concreto usado en la mitad de los años 70 fue aproximadamente de 17 billones de toneladas, aumentando en unos 10 millones de toneladas a mediados de los años 80. El desarrollo que ha tenido la industria de la construcción, hace esperar también un aumento en el uso del concreto. (Idorn G. M., Svensson S. E, 1989)

En la siguiente tabla se presenta un cálculo aproximado de producción de concreto en base a una población determinada:

Tabla 2.2: Cálculo aproximado de la producción de concreto para el año 2000, basado en tres estimaciones de consumo por habitante, con una población de 6.000 millones

| Cemento<br>(kg/hab) | Total cemento<br>(Mil mill-ton) | Arena y grava<br>(Mil mil-ton) | Concreto<br>(Mil mil-ton) |
|---------------------|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| 300                 | 1,8                             | 17                             | 19,5                      |
| 400                 | 2,4                             | 23                             | 26,8                      |
| 500                 | 3,0                             | 28                             | 32,8                      |

Fuente: Idorn G. M, 1990, Concrete Forever

Se tiene información de la aplicación de procesos de reciclaje de los RMC en otros países. El concreto es 100% reciclable, siempre que no esté contaminado por materiales no recomendados (arcilla, madera, vidrio, materia orgánica, entre otros), y algunos países han hecho planes para reciclarlo, tal como Japón que desea reciclar de 10 a 12 millones de toneladas por año. A su vez, en Estados Unidos se reciclan constantemente los pavimentos de concreto, utilizando como agregado una mezcla de materiales naturales y reciclados, con lo que se ha logrado ahorrar un 16 % del material convencional. (Hansen T. C, 1986)

Además, según el Gremio de Entidades del Reciclaje de España, únicamente el 5% de los residuos de materiales de construcción en este país son reciclados, 38 millones de toneladas acaban en vertederos y únicamente dos se reciclan. Por el contrario, en países como Alemania, Holanda, Dinamarca, la fracción reciclada alcanza el 60%, hecho motivado principalmente por la existencia de sistemas de impuestos, que incentivan el reciclaje y penalizan el vertido.

En España existen impuestos para el vertido de los RMC de 20 a 30 euros por tonelada, y a su vez en toda obra civil se exige la utilización de un porcentaje de materiales reciclados. (Ambientum, 2003)

El Ministerio del Medio ambiente en Dinamarca tuvo un plan de acción en la década de los 90 que consiguió reciclar el 50% del total de residuos producidos en la industria de la construcción, impuso una tasa de aproximadamente 16 euros por tonelada de residuos que no se reciclen, siendo éste un logro relevante reconocido por cualquier entendido en el tema. Un ejemplo en la actividad de reciclaje de este país, es la demolición de dos puentes, donde aproximadamente 1.400 toneladas de concreto sirvieron para los cimientos y las baldosas del suelo de nuevos edificios, lo que significó un ahorro de 15 dólares por tonelada con respecto a la demolición y depósito del material siguiendo los métodos tradicionales. (Arq. Enrique Hernández Castillo, 2005)

Tabla 2.3: Ejemplo de las posibilidades de reutilización de los fragmentos de ladrillo y concreto

| Aplicación                  | Proyecto ejemplo   | Material residual           |
|-----------------------------|--|-----------------------------|
| Agregados en concreto nuevo | Aeropuertos, puertos y autopistas, puentes   | concreto triturado          |
|                             | Alcantarillado de concreto   |                             |
|                             | Plantas medioambientales:<br>- planta de tratamiento de agua<br>- estación de bombeo |                             |
|                             | Edificaciones:<br>-cimientos<br>-suelos<br>- paredes                                 | concreto/ladrillo triturado |

Fuente: Reunión Internacional de Laboratorios de Ensayos e Investigación sobre los Materiales y las Construcciones, 1989



### **2.3. Mezcla de concreto**

El concreto es la mezcla de cemento, agregado fino, agregado grueso y agua, en proporciones adecuadas para asegurar una resistencia requerida.

El concreto forma parte de los materiales de construcción que se encuentran en cualquier edificación, ha seguido la evolución de los conocimientos científicos y técnicos a lo largo del tiempo, tanto en lo que se refiere a sus componentes como a la tecnología de su fabricación.

La fabricación del concreto ha recibido un impulso tecnológico, pasando de una fabricación artesanal a una fabricación industrial, utilizando productos de calidad y procedimientos industriales que le permitan garantizar la producción de concretos de calidad.

En la construcción de una edificación se presentan técnicas y materiales muy diversos, lo que ha generado la introducción de innovaciones en todos los aspectos y en la necesidad de probar y demostrar que cuando un producto se va a utilizar en la construcción, debe satisfacer las exigencias funcionales y las características que se le pidan.

El diseño de mezclas de concreto se realiza de acuerdo con su aplicación, las propiedades más importantes que se deben ensayar son las siguientes:

- **Trabajabilidad:** depende de la consistencia de la mezcla, de la granulometría de la arena utilizada, de la cantidad de finos y del empleo de aditivos.



- Capacidad de retención de agua: para asegurar que la mezcla no pierde rápidamente el agua de amasado al contacto con la superficie a aplicar, alterando el proceso de fraguado.
- Resistencias mecánicas adecuadas al elemento a construirse.

#### **2.4. Componentes para mezclas de concreto**

Los agregados están constituidos por partículas inertes, naturales o artificiales, son componentes de las mezclas de morteros y concretos. Se clasifican en agregado grueso y agregado fino.

El tamaño máximo nominal de un agregado, es el menor tamaño del tamiz por el cual debe pasar la mayor parte del agregado. El tamiz de tamaño máximo nominal puede retener de 5% a 15% del agregado.

Se considera que el agregado “pasa” por un tamiz, siempre que éste no retenga más de un 5% en peso del material tamizado. Se dice que un agregado es “retenido” por un tamiz cuando éste no deja pasar más de un 5% en peso del material tamizado. A su vez, para obtener una mezcla de concreto de mejor calidad, la granulometría utilizada debe ser continua. (Norma Técnica Peruana 400.011)

El agregado fino es aquel que resulta de la desintegración y/o abrasión natural o artificial de rocas.

La clasificación general por granulometría del agregado fino es la siguiente:

- Arena gruesa: 2-5 mm
- Arena fina: 0,08-2 mm

- Polvo o fino de la arena: < 0,08 mm

El agregado grueso consiste en una grava o un agregado triturado cuyas partículas sean predominantemente mayores a 5 mm y generalmente entre 9,5 mm y 38 mm.

En este Trabajo de Investigación se trabajan algunas de las características presentadas en la Norma COVENIN 277-2000 “Concreto. Agregados. Requisitos”, en la cual se expresan las propiedades que deben cumplir los agregados a utilizar en mezclas de concreto:

Algunas de las propiedades exigidas en la Norma que fueron estudiadas en este Trabajo son:

Para agregado fino:

- La arena debe estar constituida por arena de río, de mina, proveniente de piedras trituradas ó arena de mar. Se especifica que la arena proveniente de reciclaje de materiales de construcción es un caso especial a objeto de estudio.
- Establece valores límites en la granulometría, y expresa que el agregado fino es aquel que pasa el tamiz COVENIN 4,76 mm (N°4) y es retenido en el tamiz COVENIN 75 µm (N°200).
- Establece valores límites para el contenido de sustancias nocivas.

Las arenas provenientes de la desintegración mecánica de rocas mayores, proporcionan una mayor trabazón que genera una mayor resistencia del concreto. A su vez, no deben contener grandes cantidades de polvo de machaqueo, pues

supondría un incremento de finos en la mezcla, y por tanto mayor cantidad de agua de amasado y menor resistencia.

Para agregado grueso:

- El agregado grueso debe estar constituido por piedra triturada ó canto rodado. Se especifica que el agregado grueso proveniente del reciclaje de materiales de construcción es un caso especial a objeto de estudio.
- Establece valores límites en la granulometría, presentados en la Tabla N°3 de la Norma.
- Establece valores límites para el contenido de sustancias nocivas.
- Establece un límite de resistencia al desgaste del agregado.

Los agregados a utilizarse en este Trabajo de Investigación, son provenientes de residuos de materiales de construcción procesados, son agregados artificiales que se obtienen de la disgregación mecánica de rocas mayores, por trituración, cribado y selección, por lo que se estudian otras propiedades además de algunas de las exigidas en esta norma.

Para la utilización de agregados reciclados en mezclas de concreto se establece la siguiente clasificación para el Trabajo de Investigación:

- Tipo I: Proveniente de residuos de elementos de mampostería y de concreto.
- Tipo II: Proveniente de residuos de elementos de concreto.

El agua de mezclado que se agrega a las mezclas de concreto, genera la fluidez necesaria para trabajar la mezcla y es la que reacciona con el cemento, para darle a la mezcla las propiedades resistentes.

En este Trabajo de Investigación se trabaja con agua potable, siguiendo los requisitos expresados en la Norma COVENIN 2385-2000 “Concreto y Mortero. Agua de Mezclado. Requisitos”.

El cemento es un conglomerante hidráulico hecho de sílice, alúmina, cal, óxido de hierro y óxido de magnesio, que se endurece cuando se mezcla con agua. (Ambientum, 2003)

En este Trabajo de Investigación el cemento a utilizar es el cemento gris Portland Tipo I.

## **2.5. Instalaciones, maquinaria y técnicas utilizadas para el procesado de los RMC**

El procesamiento del material se realiza en instalaciones que se construyen en dos versiones básicas: fijas y móviles. El principio de funcionamiento de ambas es el mismo. Se trata de combinar procesos de machaqueo del residuo recibido con cribados, por tamaño. Todo ello según sea el material recibido y el producto que desea obtenerse. En ambos casos, los tipos de residuos tratables son los de material cerámico, asfálticos, concreto en masa, armado y prefabricado, mezclas de tierras y piedras naturales.

Las instalaciones fijas se diseñan para dar un servicio continuo a una zona concreta. Por ello es imprescindible contar con una ubicación relativamente céntrica en el ámbito geográfico de producción de los residuos, para disminuir los costos de transporte del material, por otro lado requieren de un apoyo desde las administraciones que deben obligar, a través de licencias de obra, a los

transportistas de residuos de materiales de construcción a descargar el material en estas plantas.

Por el contrario, las instalaciones móviles se diseñan con el objeto de desplazarse dentro de los vertederos, según la disposición de los materiales en el mismo, entre distintas obras o zonas con varias obras para tratar los residuos producidos. Este tipo de instalación se caracteriza principalmente porque cada elemento (criba, machacadora, otras) está instalado sobre un equipo autoportante, normalmente de orugas, que permite su propio desplazamiento y la carga sobre camión. La combinación de varias de estas unidades, según necesidades, puede alcanzar incluso mayor versatilidad que una instalación fija. (Ambientum, 2003)

La determinación sobre la instalación de una planta móvil depende de factores tanto técnicos como económicos, entre otros.

Existen varios fabricantes y modelos de máquinas diseñadas para la actividad de reciclaje de residuos de materiales de construcción. La siguiente máquina es la utilizada en la realización de este Trabajo de Investigación:

Maquinaria Rubble Master RM-80:

La trituradora RM-80 está programada para un rendimiento continuo gracias a la alimentación automática que regula el flujo según la carga de la trituradora, el material y el tipo de alimentación. (Ver Foto N°1 y N°2)

El RM-80 es flexible en cuanto al material procesable. Durante el reciclado, el separador magnético extrae con precisión el acero de refuerzo del material triturado. Un solo operador puede manejar y maniobrar el RM-80 utilizando el control remoto.



La trituradora móvil sobre orugas se puede desplazar en áreas estrechas y zonas montañosas. El RM-80 es muy versátil y en sólo 10 minutos se puede colocar en funcionamiento. Presenta el sistema ENVIRO RM, para la reducción de polvo y ruido, además del accionamiento diesel/eléctrico, con un motor de bajo consumo y bajos niveles de emisión, procurando el máximo respeto a los residentes y al ambiente.



Foto N°1: Ilustración de la maquinaria Rubble Master RM-80, recibiendo residuos de materiales de construcción





Foto N°2: Ilustración de la maquinaria Rubble Master RM-80

En cualquier caso, la eficacia de estos procesos de reciclado está determinada por la calidad del producto final obtenido, la cual dependerá directamente del tipo de material pétreo inicial. La cuestión radica en conseguir un residuo pétreo con características y calidades homogéneas, lo cual sucede en muy pocas ocasiones, únicamente en aquellas obras que exista una correcta gestión de los residuos producidos basada en la clasificación en origen. Esto se consigue mediante técnicas de separación selectiva de los residuos en las obras, colocándolos en varios contenedores o apilamientos de construcción en la obra ó

en un espacio céntrico para una zona donde se realicen varias actividades de construcción y/o demolición.

Los residuos de las nuevas construcciones y de restauraciones se clasifican en el lugar de producción o en un lugar especial de tratamiento, y resulta en estos casos bastante simple. Por el contrario, la clasificación de los residuos de construcción procedentes de la demolición es un proceso más complicado, se requiere que se aplique la demolición selectiva, lo que obliga a que, antes y durante la demolición, se lleve a cabo una separación de los diferentes materiales: pétreos, la madera, el papel, el cartón, el plástico, otros. Esto hace que el proceso selectivo de demolición sea más costoso en comparación a los métodos tradicionales de demolición.

## **2.6. Impacto ambiental generado por la inadecuada disposición de los RMC**

Los productos obtenidos en el reciclaje de los RPMC se pueden emplear en distintos usos según sus características. La mejor calidad se obtiene mediante triturado y clasificado y la peor, únicamente con cribado. Se han realizado multitud de ensayos en algunos países para determinar las propiedades exactas de cada tipo de producto con el objetivo de ampliar su campo de uso.

Las organizaciones mundiales que se preocupan del medio ambiente, trabajan por dar una solución al impacto ambiental que producen los vertederos de RMC, las áreas destinadas para estas actividades quedan despojadas de la capa vegetal. Se están llevando a cabo investigaciones en la Comunidad Europea a escala real para estudiar las propiedades físicas del residuo pétreo y la posible reutilización como arena.

Actualmente, a nivel mundial se recicla una cantidad muy pequeña de estos residuos, la mayor parte va a parar a los vertederos o se utiliza como relleno, sin tener presente el impacto ecológico que esto puede traer. El interés por el reciclado es mínimo debido al bajo coste del vertido y a la disponibilidad de recursos naturales. Por otro lado, las políticas de gestión de residuos son muy recientes y todavía no fuerzan un cambio de actuación en el sector de la construcción.

A pesar de ello, esta situación está cambiando poco a poco debido principalmente a las iniciativas privadas, que están promoviendo el reciclaje de los RMC; no por motivos ecológicos, sino económicos, ya que correctamente explotado podría resultar rentable como fuente de áridos para la construcción.

Las Ley Orgánica del Ambiente relacionada con la conservación del ambiente en Venezuela es elaborada y exigida por el Ministerio del Poder Popular para el Ambiente, en el conjunto de artículos no se encuentra alguno referido al reciclaje y utilización de los residuos de materiales de construcción, por lo que la aplicación de ésta actividad en Venezuela se comienza planteando como una ventaja económica, para obtener atención del sector de la construcción, por ser la materia ambiental un aspecto que todos comprenden pero la mayoría no participa. Esta actividad debe ser exigida por el Ministerio por el nivel de contaminación de estos materiales.

## **2.7. Referencias de reciclaje de RMC en Venezuela**

### **2.7.1. Empresa Yanes Ingenieros Constructores**

La empresa Yanes Ingenieros Constructores, es una empresa con valores de conservación del ambiente que se dedica a la construcción y demolición de edificaciones aplicando técnicas tecnológicas que minimizan el impacto ambiental, además buscan promover el reciclaje de los materiales residuales de obras civiles.

Actualmente, dicha empresa realiza una obra de demolición de una edificación de varios pisos de altura, en la cual se decidió aplicar una técnica de reciclaje de los residuos que consiste en realizar una demolición selectiva específica, la cual se basa en retirar de la edificación todos los elementos no fijos y luego se sigue con la demolición de los elementos restantes. Se realiza una clasificación primaria en la que separan las fracciones grandes de acero de los materiales residuales de la demolición, estos son vertidos en una máquina machacadora que separa las fracciones restantes de acero y reduce las fracciones pétreas al tamaño deseado.

A su vez, clasifican los elementos pétreos para la demolición de la edificación, para así obtener residuos pétreos procesados y clasificados. La clasificación utilizada es:

- Elementos de la edificación como: paredes, pisos y algunos elementos de concreto, con lo que se obtienen agregados Tipo I.
- Elementos estructurales de concreto, con lo que se obtienen agregados Tipo II.



El acero residual obtenido es vendido para ser fundido y el material pétreo procesado es vendido para que los residuos de la demolición sean aprovechados y no vertidos al ambiente. Sin embargo, la venta del material al principio no resultaba totalmente provechosa, pero luego mejoró logrando venderse el material para obras de relleno. Consideran que el material es muy productivo pero no es totalmente aprovechado por la falta de conocimiento por parte de las personas que trabajan en el área de la construcción, de las propiedades y usos que se le puede dar a este material, además de la falta de normas que planteen las condiciones de reciclaje de materiales de construcción.

La Máquina utilizada en esta obra es una planta móvil modelo RM-80 con una etiqueta Enviro.

La compañía tiene experiencias en mezclas con material pétreo reciclado para friso, pisos y bases. Además, comentan que han realizado mezclas de concreto, sin base en un diseño de mezcla para la dosificación, y han obtenido una resistencia de 280 kgf/cm<sup>2</sup>.

El reciclaje de residuos de la construcción está dirigido a sustituir las materias primas, entonces es apropiado que sean las propias autoridades las que controlen y coordinen las actividades de reciclaje desde una completa evaluación de la gestión de materias primas en cada región. Esto significa que el contratista o propietario de la obra puede ser obligado a dirigir una construcción organizada ó una demolición selectiva y disponer los residuos separados seleccionados en algunas plantas de tratamiento.

### **2.7.2. Trabajo Especial de Grado de la sobre el Reciclaje del Ladrillo de Desecho como Agregado para el Concreto, 1987**

Este Trabajo Especial de Grado fue realizado en la Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Central de Venezuela. La investigación se basó en realizar combinaciones de mezclas con agregados normales (piedra picada y arena natural) y agregados provenientes de desechos de ladrillos, manteniendo la trabajabilidad y la dosis de cemento constante, para luego estudiar el comportamiento del concreto endurecido a lo largo de 28 días. Se observó que el concreto producido por estas mezclas tuvo menor peso por unidad de volumen que el concreto normal.

Una de las finalidades de este estudio fue investigar el comportamiento del agregado de ladrillos de desecho, debido a que existen regiones en el país donde no se encuentran los agregados normales y hay que traerlos de otros lugares, generando costos adicionales por transporte.

A través de este estudio, se trató de establecer los parámetros básicos del diseño de mezcla, para luego con ellos tener los criterios para realizar el cálculo de los materiales y prever la futura resistencia que tendrá el concreto. Sin embargo, no se logró establecer un modelo matemático que sea capaz de predecir con exactitud la resistencia que tendrá el concreto a diferentes edades, esto fue debido a que ninguna de las combinaciones tuvo relación directa con la Ley de Abrams. A pesar de esto, se notó un crecimiento de la resistencia en función del tiempo, también en lo que respecta a la Relación Triangular, la mayoría de las mezclas cumplieron con dicha relación.



Se realizaron cuatro combinaciones de mezclas, las combinaciones fueron las siguientes:

- Combinación I: mezcla patrón de piedra picada y arena natural
- Combinación II: grueso de ladrillo y arena natural
- Combinación III: piedra picada y fino de ladrillo
- Combinación IV: sólo agregados de ladrillo

Se elaboró un diseño de mezcla en base a agregados de piedra picada y finos de ladrillo y otro donde se utiliza sólo ladrillo, en estos diseños se conoce la cantidad de cemento y utilizando la Relación Triangular se calculó la cantidad de agua. Estas fórmulas se obtuvieron en los gráficos elaborados con los resultados experimentales, además se obtuvo la resistencia esperada a los 28 días.

Se estudiaron características del agregado de desecho de ladrillo y del concreto endurecido realizado, los resultados fueron los siguientes:

- Absorción: Ladrillo= 14,00%  
Piedra picada= 1,17%  
Arena natural= 1,01%

Esta característica es una desventaja de los desechos de ladrillo respecto a los agregados normales, por la cantidad de agua que puede retener.

- Peso específico: Ladrillo= 2,03 kgf/m<sup>3</sup>  
Piedra picada= 2,68 kgf/m<sup>3</sup>  
Arena natural= 2,66 kgf/m<sup>3</sup>

Esta es una ventaja del material porque resulta un concreto más liviano.

- Módulo de elasticidad: Se encontró que al aumentar la cantidad de agregado de ladrillo disminuía el módulo de elasticidad.

Las conclusiones presentadas fueron:

- A excepción de la Combinación II las tres restantes combinaciones estudiadas satisfacen ampliamente las exigencias para su utilización como concreto estructural.
- La Combinación III presenta los mejores resultados, se le atribuye a las características puzolánicas del polvo de ladrillo, logrando mejores resistencias mecánicas.
- Se encontró que estos concretos cumplen con la Relación Triangular.
- En todas las mezclas se encontraron buenos ajustes entre las resistencias y el logaritmo de la edad de ensayo.

(Pino y Ron, 1987)

## **2.8. Uso de residuos pétreos de materiales de construcción (RPMC) procesados en mezclas de concreto**

Los RPMC pueden procesarse para ser aprovechados como agregado en mezclas de concreto para la construcción de diferentes elementos, en sustitución de los agregados convencionales de piedra y arena. Para este proceso primero debe existir una clasificación que permita separar los residuos pétreos de las piezas de acero y los demás tipos de materiales, para luego ser procesados.

Las mezclas de concreto compuestas con agregados de RPMC, se consideran que sólo deben ser utilizadas para la construcción de elementos no estructurales, ya que para estos la mezcla de diseño no requiere cumplir valores tan estrictos en sus propiedades, como los establecidos para una mezcla de concreto estructural, que requiere de un estudio más completo de los diferentes comportamientos que debe presentar ante las solicitaciones para las que sea diseñada.

Las mezclas diseñadas y experimentadas en este Trabajo de Investigación, se proyectan para ser utilizadas en elementos tales como:

- Aceras
- Brocales
- Canalizaciones de aguas
- Pavimentos de concreto
- Muros no estructurales
- Otros elementos urbanísticos

Además, se realizan estudios de las características químicas y físico-mecánicas de los RPMC, que pueden considerarse en otras investigaciones en las que se trabaje con este material reciclado.

Los elementos constructivos en los que pueden ser utilizadas las mezclas de concreto diseñadas en este Trabajo de Investigación, representan áreas de gran extensión, por lo que requieren de mucho material para su construcción. Es por esto que se considera que puede lograrse una alternativa para la reducción de la contaminación del ambiente con estos residuos, al conseguirles una utilidad técnica y económicamente aceptable.

El reciclaje podría generar un ahorro en el vertido de los materiales y en la compra de los agregados convencionales, generando una reducción de costos en el presupuesto de la obra. Además, se podrían obtener ingresos por la venta del acero obtenido para desecho y se produciría un aporte muy importante en el tema de la conservación del medio ambiente.

## **2.9. Diseño de mezcla de concreto**

Para la utilización del RPMC procesado como agregado en mezclas de concreto, en la construcción de diferentes elementos no estructurales, se tendrían que realizar ensayos para estudiar las características de los agregados y realizar diseños de mezcla que establezcan la dosificación óptima de los componentes y cumplan con las propiedades y características generales que requieren los elementos a construir.

Las dos propiedades más significativas al diseñar mezclas de concreto son la resistencia a la compresión y la trabajabilidad, aunque debe reconocerse que en los últimos años se ha prestado mucha atención a la durabilidad.

## **2.10. Contraste del costo de obtención de los componentes de las mezclas**

Una vez diseñada la dosificación óptima y obtenido el resultado experimental de resistencia a la compresión de cada mezcla, se podría cuantificar el costo de la elaboración por dosificación de mezclas elaboradas con agregados reciclados, y compararlo con el costo de elaboración de mezclas de concreto convencionales, utilizando una gráfica referida a la Ley de Abrams que relaciona la resistencia con la relación agua/cemento.

Esta investigación está establecida para la elaboración de mezclas de concreto para elementos no estructurales, debido a la función para la cual son diseñados estos elementos, las cuales establecen valores menores en comparación con los requeridos en elementos estructurales.

## **CAPÍTULO III**

### **MÉTODO**

#### **3.1. Aspectos generales**

Este Trabajo de Investigación se refiere a una investigación experimental, debido a que exige el estudio de las características de un elemento y su comportamiento como componente en otro, con un fin específico y en base a resultados experimentales.

El elemento en estudio son partículas de tamaño correspondiente al de los agregados de una mezcla de concreto convencional, provenientes de la desintegración mecánica de residuos pétreos de materiales de construcción obtenidos con la aplicación de dos técnicas diferentes de demolición selectiva.

A las partículas se les estudian sus características químicas y físico-mecánicas, mediante métodos experimentales, para ser comparadas con las características de los agregados comerciales utilizados en mezclas de concreto.

Además, se realizan diseños de mezclas de concreto, para el estudio del comportamiento de las partículas como componente en estas mezclas, en sustitución de la piedra y la arena, para la construcción de elementos no estructurales de concreto.

Los requisitos y experimentos aplicados a los agregados y mezclas, se realizan en base a las normas COVENIN correspondientes.

Con los resultados experimentales, se calcula el costo de elaboración de las mezclas de concreto, para compararlos con el costo de las mezclas de concreto elaboradas con agregados comerciales.

Esta investigación puede generar alternativas para la utilización de materiales de construcción provenientes de materiales reciclados, para producir un cambio en el volumen de residuos de materiales de construcción que son vertidos, consiguiendo reducir la contaminación al ambiente y ofrecer beneficios económicos al sector de la construcción.

## **3.2. Metodología de trabajo**

### **3.2.1. Obtención del residuo pétreo de materiales de construcción**

Los residuos de materiales de construcción para este Trabajo de Investigación, se obtienen en una obra de demolición selectiva específica. Por lo tanto, se requiere planificar y dirigir los trabajos de demolición de una manera completamente diferente a los métodos tradicionales. La demolición selectiva implica los siguientes pasos:

- 1) Sacar los desechos y las molduras no fijas.
- 2) Desmantelar y quitar las puertas, ventanas, tejados, instalaciones de agua, electricidad y calefacción.
- 3) Demoler la estructura del edificio.



- 4) Separar los elementos de acero de grandes dimensiones de los residuos pétreos.

El proceso de dismantlar los elementos no fijos se realiza primeramente a mano, mientras que la demolición de la estructura y la separación de los elementos se realizan con técnicas y métodos apropiados. (Ver Foto N°3)



Foto N°3: Ilustración de una demolición selectiva, clasificación de los elementos no fijos



Para la recolección de los residuos de materiales pétreos luego de la demolición de la estructura, se realiza una mínima clasificación mediante la cual se separan de los elementos grandes de acero y de la mayoría de los plásticos, quedando aún elementos de acero de dimensiones manejables para el proceso de reducción de tamaño del material residual. (Ver Foto N°4)

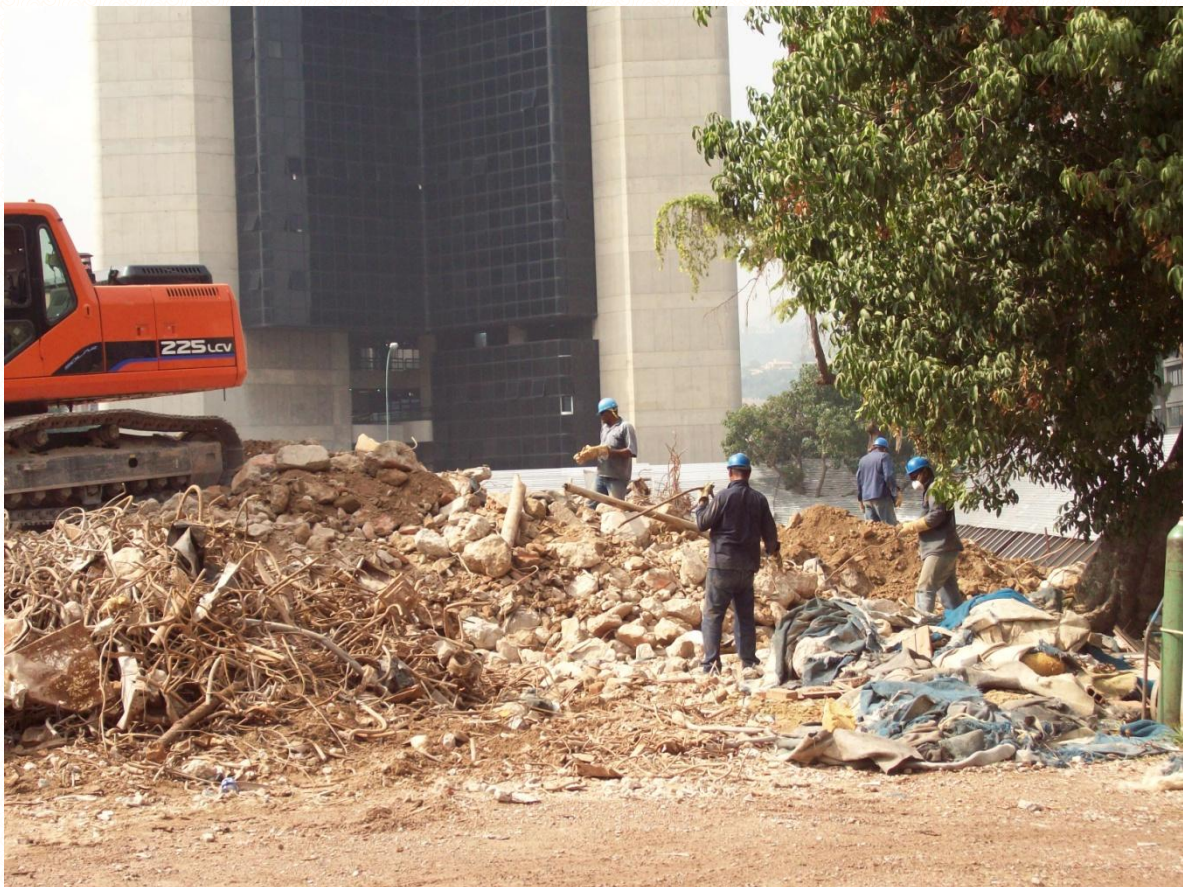


Foto N°4: Ilustración clasificación de los elementos grandes de acero y otros elementos

### **3.2.2. Reducción de tamaño del residuo pétreo de materiales de construcción**

Los residuos ya clasificados, pasan por un proceso de machacado en el que se fraccionan los elementos pétreos y se desprenden de los elementos de acero restantes de la clasificación previa, se separan por completo las fracciones pétreas y las de acero, se reducen los residuos pétreos a diferentes tamaños, luego por tamizado se obtienen las partículas de tamaño aproximado al de los agregados utilizados en mezclas de concreto.

Este proceso se realiza con máquinas machacadoras. Si se utiliza una planta ó máquina machacadora con electroimanes, ésta reduce los materiales pétreos a diferentes tamaños, separa los elementos de acero de los pétreos, vierte por un lado los materiales de acero, y los pétreos se clasifican con una cribadora.

La máquina a utilizar en este Trabajo de Investigación es de la marca Rubble Master, modelo RM-80, la cual permite un tamaño de entrada de elementos de hasta 80 cm de diámetro y al triturarlos se obtienen diferentes tamaños de partículas. Además, tiene una cribadora que separa las partículas en dos grupos que llamaremos: grandes y pequeñas. La cribadora consiste en barras separadoras que permiten el paso de partículas de un máximo de 28 mm de diámetro, correspondientes al grupo de las partículas pequeñas, y el resto es retenido y corresponde al grupo de las partículas grandes. (Ver Foto N°5)



La toma de muestras se realiza por cuarteos del material obtenido en el grupo de las partículas pequeñas. Además, se trabaja con dos tipos de muestras:

- Agregados Tipo I: provenientes de residuos de albañilería y algunos elementos de concreto.
- Agregados Tipo II: provenientes sólo de elementos de concreto.



Foto N°5: Ilustración de los grupos de partículas que separa la cribadora: gruesas y finas

### 3.2.3. Diseño de mezcla de concreto

El diseño de mezcla se realiza según el método presentado en el “Manual del Concreto Estructural” (Porrero y otros, 2004), en su capítulo VI, relativo al Diseño de Mezclas. El método propuesto considera un grupo de variables que son: dosis de cemento, trabajabilidad, relación agua/cemento y resistencia; las cuales se vinculan a través de dos leyes: Relación Triangular y Ley de Abrams. Además, mediante factores de corrección también considera la influencia de variables que tienen carácter general tales como: tamaño máximo, tipo de agregado y tipo de cemento.

Se diseñan teóricamente seis mezclas de concreto, compuestas de agua, cemento y agregados.

Los diseños de mezcla se realizan con dos tipos de agregados de residuos de materiales de construcción procesados, con un asentamiento de 8 cm, una relación agua/cemento variable en cada mezcla y para tres valores de resistencia a la compresión.

Los valores de resistencia a la compresión, corresponden a valores convencionales utilizados para mezclas de concreto, estos valores son:

- 1) Resistencia a la compresión de  $210 \text{ kgf/cm}^2$
- 2) Resistencia a la compresión de  $250 \text{ kgf/cm}^2$
- 3) Resistencia a la compresión de  $280 \text{ kgf/cm}^2$



Los diseños de mezcla se clasifican por tipo de agregado en:

- Agregados Tipo I: tres valores de resistencia a la compresión
- Agregados Tipo II: tres valores de resistencia a la compresión

#### **3.2.4. Ensayos**

Se realizan ensayos para estudiar las características químicas y físico – mecánicas de los residuos pétreos procesados y de las mezclas de concreto.

Estos ensayos se aplican siguiendo las Normas COVENIN correspondientes y se presentan en las Tablas 3.1 y 3.2

Tabla 3.1: Ensayos a aplicar a los residuos pétreos procesados

| Tipo de ensayo    | Ensayo  | Norma COVENIN correspondiente |  |
|-------------------|---|-------------------------------|--|
|                   |   | Número                        | Nombre   |
| Químico           | Contenido de impurezas orgánicas                                    | 256-1977                      | Método de ensayo para la determinación cualitativa de impurezas orgánicas en arenas para concreto (ensayo clorimétrico)                                |
|                   | Contenido de cloruros y sulfatos solubles en el agregado            | 261-1977                      | Método de ensayo para la determinación cuantitativa de cloruros y sulfatos solubles en las arenas  |
| Físico - Mecánico | Granulometría   | 255-1998                      | Agregados. Determinación de la composición granulométrica  |
|                   | Densidad y absorción del agregado fino                              | 268-1998                      | Agregado fino. Determinación de la densidad y la absorción   |
|                   | Densidad y absorción del agregado grueso                            | 269-1998                      | Agregado grueso. Determinación de la densidad y la absorción   |
|                   | Contenido de partículas menores a 20 micras en el agregado fino     | 259-1977                      | Método de ensayo para la determinación por suspensión de partículas menores de 20 micras en agregados finos  |
|                   | Contenido de materiales más finos que 74 micras en el agregado fino | 258-1977                      | Método de ensayo para la determinación por lavado del contenido de materiales más finos que el cedazo COVENIN 74 micras en agregados minerales         |
|                   | Peso unitario del agregado  | 263-1978                      | Método de ensayo para la determinación del peso unitario del agregado  |
|                   | Contenido de humedad total y superficial del agregado               | 1375-1979                     | Método de ensayo para determinar por secado el contenido de humedad total y superficial en el agregado   |
|                   | Contenido de vacíos en el agregado                                  | 274-1978                      | Método para determinar los vacíos en agregados   |
|                   | Resistencia al desgaste   | 266-1977                      | Método de ensayo para determinar la resistencia al desgaste en agregados gruesos de menores de 38,1 mm (1 1/2") por medio de la máquina de Los Ángeles |

Alcance de los ensayos a aplicar a los residuos pétreos procesados:

- Contenido de impurezas orgánicas:

Se determina cualitativamente la cantidad de impurezas orgánicas presentes en los agregados finos.

Las impurezas orgánicas que se pueden presentar en los agregados finos consisten en tejidos animales y vegetales, que están principalmente formados por carbono, nitrógeno y agua. Este tipo de materia al encontrarse en grandes cantidades afectan en forma nociva las propiedades del concreto, como la resistencia, durabilidad y el desarrollo del proceso de fraguado.

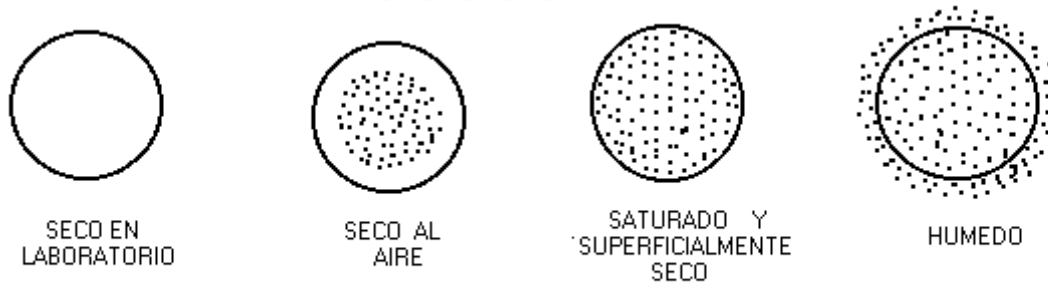
- Contenido de humedad total y superficial del agregado:

Se determina por secado el contenido de humedad total.

Humedad total:

Es el cociente entre la masa de agua evaporada por secado hasta masa constante de una muestra de agregado y la masa de la muestra de agregado seco, se expresa en porcentaje.

Figura N°1: Diferentes contenidos de agua que puede presentar una partícula



Fuente: Idorn G. M, 1990, Concrete Forever

- Contenido de cloruros y sulfatos solubles en el agregado:

Se determina cualitativamente el contenido de cloruros y sulfatos presentes en el agregado fino.

- Granulometría:

Se determina la granulometría de los agregados a utilizar en la mezcla de concreto.

La granulometría de los agregados del concreto consiste en la distribución del tamaño de sus partículas. Los resultados del análisis granulométrico también se pueden representar con una gráfica llamada curva granulométrica. Esta gráfica permite visualizar mejor la distribución de tamaños dentro de una masa de agregados, permitiendo conocer además que tan grueso o fino es el concreto. En consecuencia hay factores que se derivan de un análisis granulométrico como son:

- Tamaño máximo: es el menor tamiz por el que se pasa toda la muestra.
  - Tamaño máximo nominal: es el menor tamaño de tamiz que retiene de 5% a 15% del agregado.
- Densidad y absorción del agregado fino y grueso:

Se determinan la densidad aparente determinada sobre la base de muestra saturada y de superficie seca, y la absorción del agregado.

Absorción:

Es el incremento en la masa del agregado debido al agua en los poros del material, pero sin incluir el agua adherida a la superficie de las partículas (agregado saturado y de superficie seca), expresado como un porcentaje de la masa seca.

Densidad aparente con base saturada y de superficie seca:

Es la relación entre la masa en el aire de un volumen dado de agregado, incluyendo la masa del agua dentro de los poros saturables, después de la inmersión en agua durante  $24 \pm 4$  horas, pero sin incluir los vacíos entre las partículas, comparado con la masa de un volumen igual de agua destilada libre de gas a una temperatura establecida.

- Contenido de partículas menores a 20 micras en el agregado fino:

Se determina aproximadamente el porcentaje de partículas menores a 20 micras en el agregado fino, que quedan en suspensión después de una hora de sedimentación en agua.



- Contenido de materiales más finos que 74 micras en el agregado:

Se determina el porcentaje de material más fino que el tamiz de 74  $\mu\text{m}$  (N°200) en el agregado.

- Peso unitario del agregado:

Se determina el peso unitario compacto y suelto del agregado, con una muestra que tenga todos los tamaños de partícula a utilizar en las mezclas.

- Contenido de vacíos en el agregado:

Se determina el porcentaje de vacíos que dejan los agregados sueltos o compactados.

- Resistencia al desgaste:

Se determina el porcentaje de desgaste del agregado grueso.

Tabla 3.2: Ensayos a aplicar a las mezclas de concreto

| Tipo de ensayo    | Ensayo                              | Norma COVENIN correspondiente |  |
|-------------------|-------------------------------------|-------------------------------|--|
|                   |                                     | Número                        | Nombre   |
| Físico - Mecánico | Asentamiento                        | 339-2003                      | Concreto. Método para la medición del asentamiento con el cono de Abrams   |
|                   | Módulo de elasticidad               | 1468-1979                     | Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad en probetas cilíndricas de concreto                    |
|                   | Resistencia a la compresión         | 338-2002                      | Concreto. Método para la elaboración, curado y ensayo a compresión de cilindros de concreto                      |
|                   | Resistencia a la tracción indirecta | 341-1979                      | Método de ensayo para determinar la resistencia a la tracción indirecta del concreto usando probetas cilíndricas |
|                   | Velocidad de propagación de ondas   | 1681-1980                     | Método de ensayo para determinar la velocidad de propagación de ondas en el concreto                             |

Alcance de los ensayos a aplicar a las mezclas de concreto:

- Asentamiento:

Se determina el asentamiento de la mezcla elaborada.

- Módulo de elasticidad:

Se determina el módulo de elasticidad secante del concreto, en probetas cilíndricas, al someterlas a esfuerzos longitudinales de compresión.

- Resistencia a la compresión:

Se determina la resistencia a la compresión simple, en probetas cilíndricas, al someterlas a esfuerzos longitudinales de compresión.

El ensayo de resistencia a la compresión simple se aplica a una velocidad de 25000 kgf/min, siendo este el valor medio establecido para este ensayo.

- Resistencia a la tracción indirecta:

Se determina la resistencia a la tracción indirecta, en probetas cilíndricas, al someterlas a esfuerzos longitudinales de tracción.

El ensayo de resistencia a la tracción indirecta se aplica a una velocidad de 17000 kgf/min, la cual se encuentra entre los valores establecidos en la Norma.

- Velocidad de propagación de ondas:

Se determina el tiempo que tarda un impulso en atravesar la altura de una probeta cilíndrica, utilizando un transductor. A partir de estos datos se calcula la velocidad de propagación de la onda y se relaciona con la homogeneidad del concreto.

### **3.2.5. Características de las probetas para los ensayos**

Las dimensiones de la probeta cilíndrica a utilizar en los ensayos son las siguientes:  $152,5 \pm 2,5$  mm de diámetro y  $305 \pm 6,0$  mm de altura, siguiendo lo especificado en la Norma COVENIN 338-2002 “Concreto. Método para la elaboración, curado y ensayo a compresión de cilindros de concreto”.

En todos los ensayos que requieren probetas cilíndricas se elaboran mínimo dos probetas por mezcla, para disminuir el efecto que la dispersión del

ensayo pueda tener sobre la dispersión entre muestras de una misma mezcla, siendo el valor del ensayo para cada mezcla la media aritmética de los resultados del ensayo.

### 3.2.6. Ensayos a probetas de mezclas diseñadas

Los ensayos a aplicarse a cada una de las mezclas, se presentan en la siguiente tabla, la cual indica el tipo y la cantidad de probetas por ensayo, además de las edades correspondientes para su realización:

Tabla 3.3: Ensayos a probetas de una mezcla diseñada

| Tipo de probeta    | Ensayo                              | Nº probetas/edad de ensayo |         | Nº total de probetas |
|--------------------|-------------------------------------|----------------------------|---------|----------------------|
|                    |                                     | 7 días                     | 28 días |                      |
| Probeta cilíndrica | Módulo de elasticidad               | -                          | 2       | 2                    |
|                    | Resistencia a la compresión         | 3                          | 3       | 6                    |
|                    | Resistencia a la tracción indirecta | 3                          | 3       | 6                    |

### **3.2.7. Cálculo del costo de los componentes de mezclas de concreto diseñadas con agregados reciclados y con agregados convencionales, utilizando una gráfica referida a la Ley de Abrams**

El costo se calcula para un volumen de  $1 \text{ m}^3$  de mezcla de concreto. Se diseña la dosificación óptima para cada mezcla y se calcula el costo del mercado actual de obtención de los elementos que la componen: agua, cemento y agregados.

Estos diseños se realizan por medio de una gráfica de resistencia a la compresión vs relación agua/cemento referida a la Ley de Abrams, de la siguiente manera:

- Las curvas para agregados convencionales son conocidas y están establecidas para las edades de 7 y 28 días.
- Se grafican las curvas de las mezclas diseñadas con agregados reciclados, con los valores de relación agua/cemento de diseño de las mezclas elaboradas y los valores de resistencia a la compresión obtenidos experimentalmente, para cada tipo de agregado y edad de ensayo (se realiza una gráfica por edad de ensayo).
- Se estudia el comportamiento de las curvas y se comparan entre ellas.
- Se establece un valor de resistencia a la compresión con el que se cortan las curvas (correspondientes a una misma edad de ensayo) y se obtienen valores de relación agua/cemento para cada tipo de agregado (agregados convencionales, agregados Tipo I y Tipo II).
- Se realiza el diseño de mezcla de cada tipo de agregado con el valor de relación agua/cemento obtenido.



- Se calcula el costo de elaboración de cada mezcla en base a la dosificación obtenida y el costo en el mercado de cada uno de los componentes.
- Se compara el costo de elaboración de cada una de las mezclas.

### **3.2.8. Contraste de los costos de elaboración de las mezclas de concreto**

Se compara el costo de elaboración de las mezclas de concreto diseñadas con agregado convencional, con las realizadas con agregados de residuos pétreos de materiales de construcción procesados, para determinar cuál de los agregados genera un menor costo de producción de mezclas de concreto.

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS Y ANÁLISIS**

#### **4.1. Características generales de los residuos pétreos de materiales de construcción**

Los residuos de materiales de construcción se tomaron de una obra de demolición selectiva, donde se realiza la demolición de una edificación y el procesamiento de los residuos pétreos mediante una máquina de marca Rubble Master, modelo RM-80, la cual tiene una cribadora que separa el residuo procesado en dos tamaños: grandes y pequeños.

Los residuos procesados se encontraban clasificados en pilas con diferentes características. Se encontraban agrupados por:

- Tamaño de las partículas:
  - Grandes
  - Pequeñas
- Tipo de residuo de materiales de construcción:
  - Agregados Tipo I: Provenientes de elementos de concreto de la edificación y elementos de mampostería. (Ver Foto N°8)
  - Agregados Tipo II: Provenientes de elementos de concreto de la edificación (vigas, columnas y losas). (Ver Foto N°9)

El tamaño de las partículas utilizado en esta Investigación es el correspondiente al grupo de las partículas pequeñas, obtenidas de la máquina procesadora, y de los dos tipos de materiales de construcción procesados.

Las muestras se tomaron en sacos en diferentes zonas de las pilas, considerando la segregación que presenta el material con esta técnica de almacenamiento, se cuartearon en el laboratorio, utilizando una cuarteadora mecánica, para obtener una muestra representativa de los residuos procesados. (Ver Foto N°6 y N°7)



Foto N°6: Ilustración del almacenamiento en pilas de los residuos pétreos de materiales de construcción procesados

Se colocó una separación de barras de dos espacios en la cuarteadora, para eliminar los tamaños retenidos en ésta, considerándolos como partículas muy grandes para utilizarse como agregados en las mezclas de concreto. Las partículas pasantes son agregados con una gradación completa ó combinados, ya que contienen partículas finas y gruesas.



Foto N°7: Ilustración del cuarteo de agregados Tipo I

Todos los ensayos se realizaron para cada tipo de materiales de construcción procesados y cuarteados. Algunos ensayos se realizaron separando las muestras en partículas finas y gruesas, otros se realizaron con muestras de agregados combinados.



Los agregados presentan características visuales importantes que determinan su composición general. Estas características son:

- Presencia de partículas no recomendables para mezclas de concreto:  
Se encontró mayor cantidad de fracciones de materiales no recomendables en los agregados Tipo I, por la composición de los elementos de origen. Los materiales considerados como no recomendables son: madera, vidrio, plástico, acero, anímite, textiles, cerámica, ladrillo, entre los cuales se encontraban en mayor proporción la madera y los materiales de arcilla. Los agregados Tipo II presentan poca cantidad de partículas no recomendables y sólo de madera, arcilla y acero.
- Forma de las partículas:  
Las partículas en general se presentan en todo tipo de formas superficiales y geométricas, ya que dependen de las características de los diferentes materiales residuales de los que provienen.

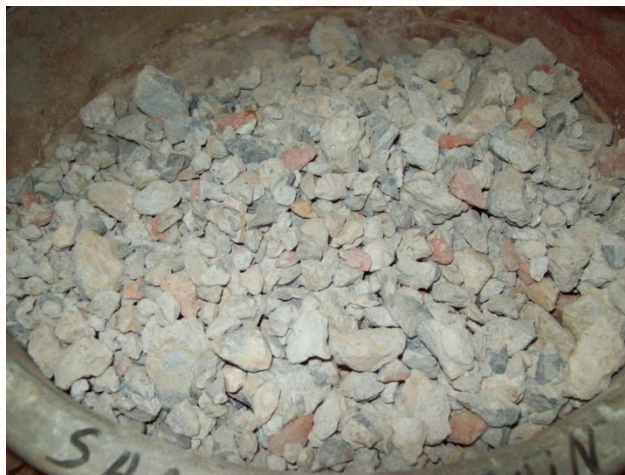


Foto N°8: Ilustración del agregado grueso Tipo II





Foto N°9: Ilustración del agregado grueso Tipo I

#### **4.2. Resultados y análisis de los ensayos aplicados a los residuos pétreos de materiales de construcción procesados**

Los ensayos aplicados a los residuos pétreos de materiales de construcción fueron escogidos con el fin de estudiar los parámetros que evaluarán las características más relevantes del material y su comportamiento como agregado en mezclas de concreto.

Entre los ensayos realizados se evaluaron algunos de los parámetros requeridos para los agregados a utilizarse en mezclas de concreto, establecidos en la Norma COVENIN 277-2000 “Concreto. Agregados. Requisitos”. (Ver Tabla 3.1)

Los resultados experimentales se compararon con los valores establecidos en las Normas COVENIN, y en el caso de no existir un requisito normativo se compararon con valores usuales de los agregados utilizados en mezclas de concreto, consultados en el Manual del Concreto Estructural (Porrero y otros, 2004). Los resultados obtenidos y requisitos para cada ensayo se presentan a continuación:

#### 4.2.1. Granulometría

Tabla 4.1: Resultados del ensayo de granulometría del agregado fino Tipo I  
Peso de muestra= 500 gr

| Granulometría agregado fino Tipo I |                       |                    |            |             |           |                 |                 |
|------------------------------------|-----------------------|--------------------|------------|-------------|-----------|-----------------|-----------------|
| Tamiz                              | Tamaño partícula (mm) | Peso retenido (gr) | % retenido | % acumulado | % pasante | Límite superior | Límite inferior |
| Nº 4                               | 4,760                 | 41                 | 8,20       | 8,20        | 91,80     | 100             | 85              |
| Nº 8                               | 2,380                 | 120                | 24,00      | 32,20       | 67,80     | 95              | 60              |
| Nº 16                              | 1,190                 | 105                | 21,00      | 53,20       | 46,80     | 80              | 40              |
| Nº 30                              | 0,595                 | 79                 | 15,80      | 69,00       | 31,00     | 60              | 20              |
| Nº 50                              | 0,297                 | 89                 | 17,80      | 86,80       | 13,20     | 30              | 8               |
| Nº 100                             | 0,149                 | 41                 | 8,20       | 95,00       | 5,00      | 10              | 2               |
| Nº 200                             | 0,075                 | 11                 | 2,20       | 97,20       | 2,80      | 5               | 0               |

Gráfico N°1: Curva granulométrica del agregado fino Tipo I

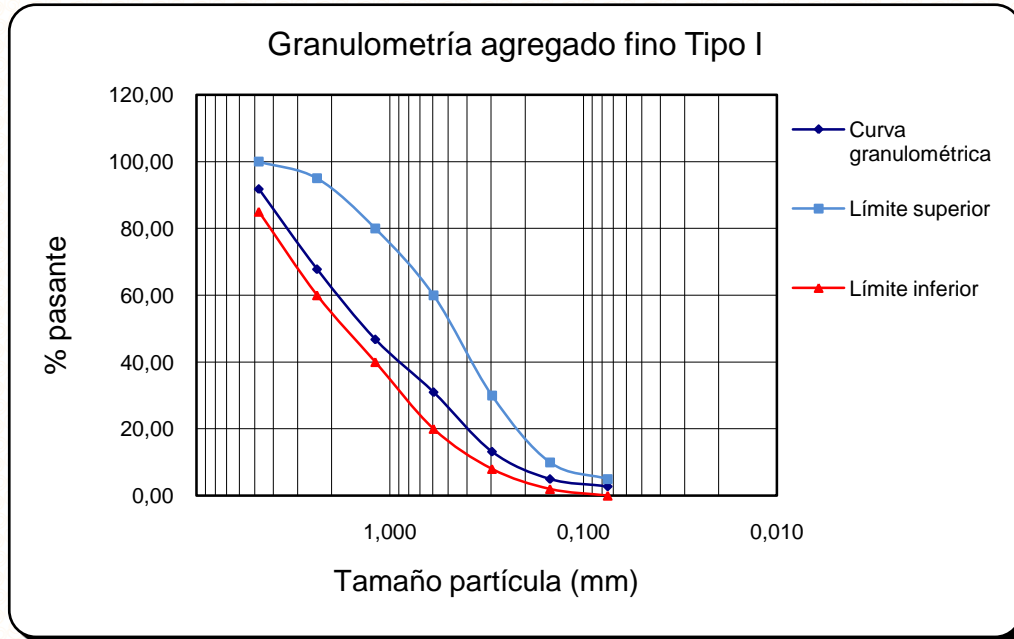


Tabla 4.2: Resultados del ensayo de granulometría del agregado grueso Tipo I

Peso de muestra= 9500 gr

| Granulometría agregado grueso Tipo I |                       |                    |            |             |           |                 |                 |
|--------------------------------------|-----------------------|--------------------|------------|-------------|-----------|-----------------|-----------------|
| Tamiz                                | Tamaño partícula (mm) | Peso retenido (gr) | % retenido | % acumulado | % pasante | Límite superior | Límite inferior |
| 1 1/2"                               | 38,100                | 0                  | 0,00       | 0,00        | 100,00    | 100             | 100             |
| 1"                                   | 25,400                | 510                | 5,37       | 5,37        | 94,63     | 100             | 90              |
| 3/4"                                 | 19,000                | 1658               | 17,45      | 22,82       | 77,18     | 90              | 50              |
| 1/2"                                 | 12,700                | 2967               | 31,23      | 54,05       | 45,95     | 45              | 15              |
| 3/8"                                 | 9,510                 | 1535               | 16,16      | 70,21       | 29,79     | 20              | 0               |
| 1/4"                                 | 6,350                 | 2624               | 27,62      | 97,83       | 2,17      | 7               | 0               |

Gráfico N°2: Curva granulométrica del agregado grueso Tipo I

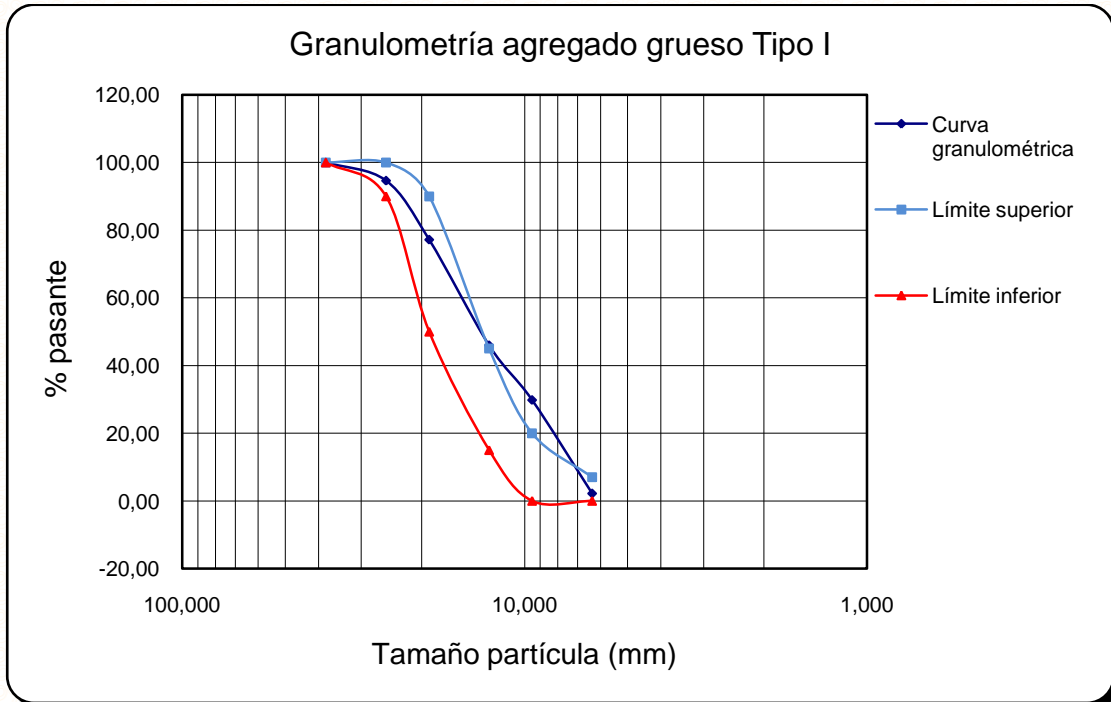


Tabla 4.3: Resultados del ensayo de granulometría del agregado fino Tipo II

Peso de muestra= 500 gr

| Granulometría agregado fino Tipo II |                       |                    |            |             |           |                 |                 |
|-------------------------------------|-----------------------|--------------------|------------|-------------|-----------|-----------------|-----------------|
| Tamiz                               | Tamaño partícula (mm) | Peso retenido (gr) | % retenido | % acumulado | % pasante | Límite superior | Límite inferior |
| Nº 4                                | 4,760                 | 50                 | 10,00      | 10,00       | 90,00     | 100             | 85              |
| Nº 8                                | 2,380                 | 118                | 23,60      | 33,60       | 66,40     | 95              | 60              |
| Nº 16                               | 1,190                 | 102                | 20,40      | 54,00       | 46,00     | 80              | 40              |
| Nº 30                               | 0,595                 | 90                 | 18,00      | 72,00       | 28,00     | 60              | 20              |
| Nº 50                               | 0,297                 | 88                 | 17,60      | 89,60       | 10,40     | 30              | 8               |
| Nº 100                              | 0,149                 | 33                 | 6,60       | 96,20       | 3,80      | 10              | 2               |
| Nº 200                              | 0,075                 | 11                 | 2,20       | 98,40       | 1,60      | 5               | 0               |

Gráfico N°3: Curva granulométrica del agregado fino Tipo II

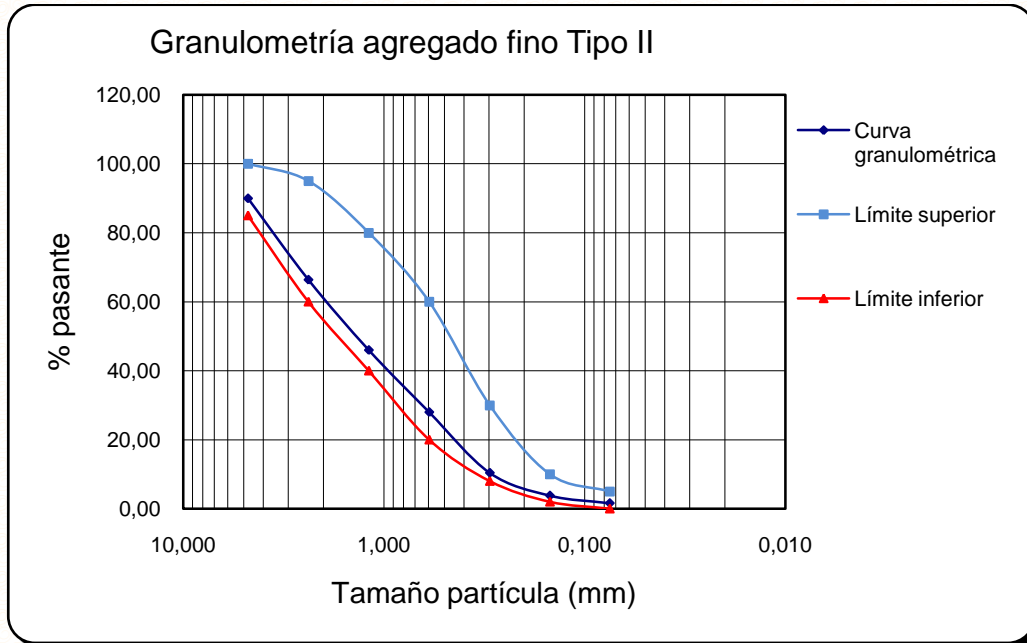


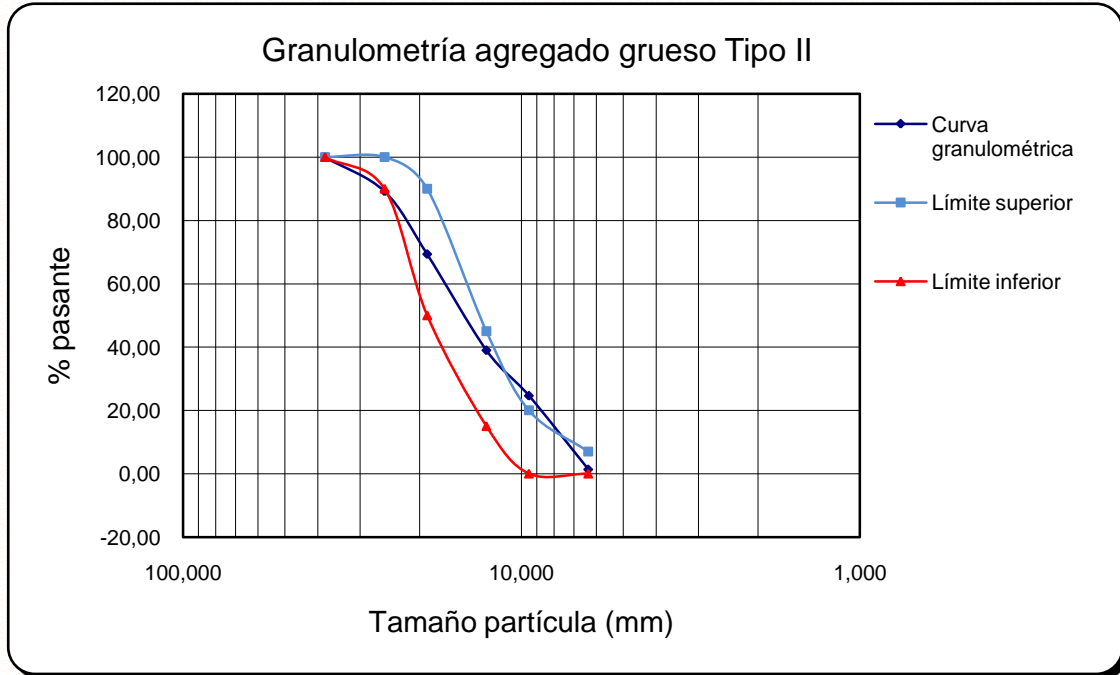
Tabla 4.4: Resultados del ensayo de granulometría del agregado grueso Tipo II

Peso de muestra= 12500 gr

| Granulometría agregado grueso Tipo II |                       |                    |            |             |           |                 |                 |
|---------------------------------------|-----------------------|--------------------|------------|-------------|-----------|-----------------|-----------------|
| Tamiz                                 | Tamaño partícula (mm) | Peso retenido (gr) | % retenido | % acumulado | % pasante | Límite superior | Límite inferior |
| 1 1/2"                                | 38,100                | 0                  | 0,00       | 0,00        | 100,00    | 100             | 100             |
| 1"                                    | 25,400                | 1352               | 10,82      | 10,82       | 89,18     | 100             | 90              |
| 3/4"                                  | 19,000                | 2480               | 19,84      | 30,66       | 69,34     | 90              | 50              |
| 1/2"                                  | 12,700                | 3793               | 30,34      | 61,00       | 39,00     | 45              | 15              |
| 3/8"                                  | 9,510                 | 1794               | 14,35      | 75,35       | 24,65     | 20              | 0               |
| 1/4"                                  | 6,350                 | 2908               | 23,26      | 98,62       | 1,38      | 7               | 0               |



Gráfico N°4: Curva granulométrica del agregado grueso Tipo II



La granulometría de los agregados se realizó con los límites granulométricos establecidos en la Norma COVENIN 277-2000 “Concreto. Agregados. Requisitos”, en la que se presentan límites granulométricos para partículas finas y para partículas gruesas. Los límites para las partículas gruesas que se utilizaron son los establecidos para la piedra picada N°1.

Los agregados finos de los dos tipos de agregados presentaron una gradación dentro de los límites granulométricos establecidos en la Norma. A su vez, los agregados gruesos presentaron una deficiencia de partículas de tamaño correspondiente a 3/8” y en general no tienen un buen ajuste en la media de los límites establecidos en la Norma.

Los agregados presentaron una granulometría de partículas finas y gruesas, en su mayoría, dentro de los límites establecidos, pero la correspondiente a las partículas gruesas no se considera aceptable. De necesitarse los agregados separados por tamaño en partículas finas y gruesas, para elaborar mezclas de concreto, se tendría que realizar un ajuste de las partículas gruesas de los tamaños deficientes.

Para la elaboración de las mezclas de concreto en este Trabajo de Investigación se utilizaron los agregados con la granulometría combinada de las Tablas 4.5 y 4.6.

Tabla 4.5: Resultados del ensayo de granulometría del agregado combinado Tipo I

| Granulometría agregado combinado Tipo I |                       |                    |            |             |           |                 |                 |
|---|-----------------------|--------------------|------------|-------------|-----------|-----------------|-----------------|
| Tamiz                                   | Tamaño partícula (mm) | Peso retenido (gr) | % retenido | % acumulado | % pasante | Límite superior | Límite inferior |
| 1 ½"                                    | 38,100                | 0                  | 0,00       | 0,00        | 100,00    | 100             | 100             |
| 1"                                      | 25,400                | 510                | 2,55       | 2,55        | 97,45     | 100             | 90              |
| ¾"                                      | 19,000                | 1658               | 8,29       | 10,84       | 89,16     | 90              | 70              |
| ½"                                      | 12,700                | 2967               | 14,84      | 25,68       | 74,33     | 75              | 55              |
| 3/8"                                    | 9,510                 | 1535               | 7,68       | 33,35       | 66,65     | 68              | 45              |
| ¼"                                      | 6,350                 | 2624               | 13,12      | 46,47       | 53,53     | 60              | 35              |
| Nº 4                                    | 4,760                 | 41                 | 4,39       | 50,86       | 49,14     | 55              | 30              |
| Nº 8                                    | 2,380                 | 120                | 12,85      | 63,71       | 36,29     | 45              | 20              |
| Nº 16                                   | 1,190                 | 105                | 11,24      | 74,95       | 25,05     | 35              | 15              |
| Nº 30                                   | 0,595                 | 79                 | 8,46       | 83,41       | 16,59     | 25              | 10              |
| Nº 50                                   | 0,297                 | 89                 | 9,53       | 92,93       | 7,07      | 16              | 5               |
| Nº 100                                  | 0,149                 | 41                 | 4,39       | 97,32       | 2,68      | 8               | 1               |
| Nº 200                                  | 0,075                 | 11                 | 1,18       | 98,50       | 1,50      | -               | -               |

Tamaño máximo nominal= 3/4"

Gráfico N°5: Curva granulométrica del agregado combinado Tipo I

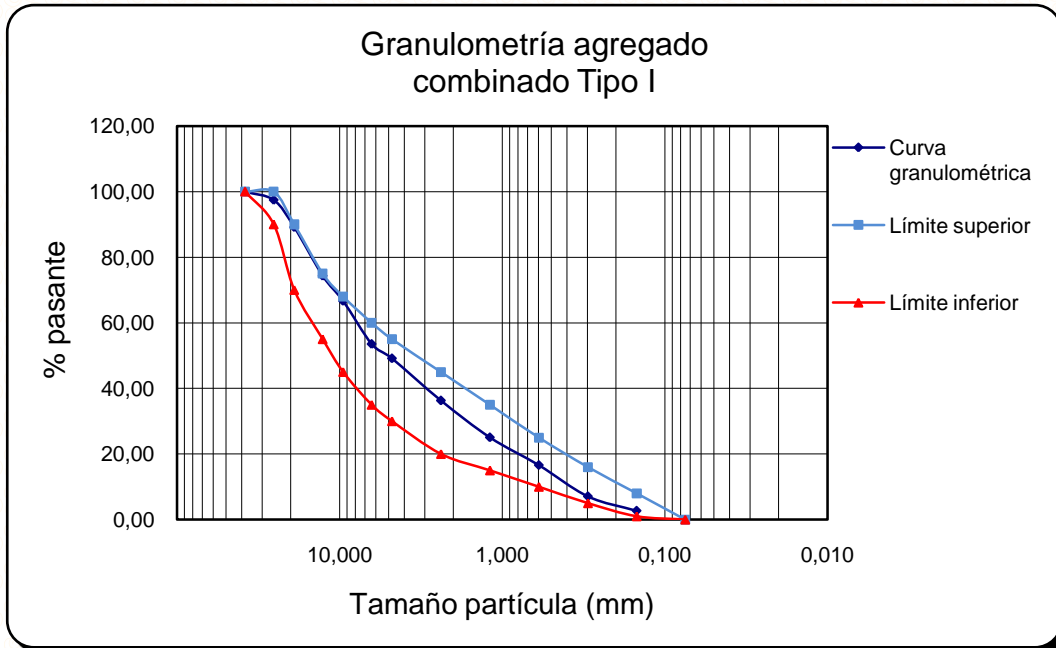
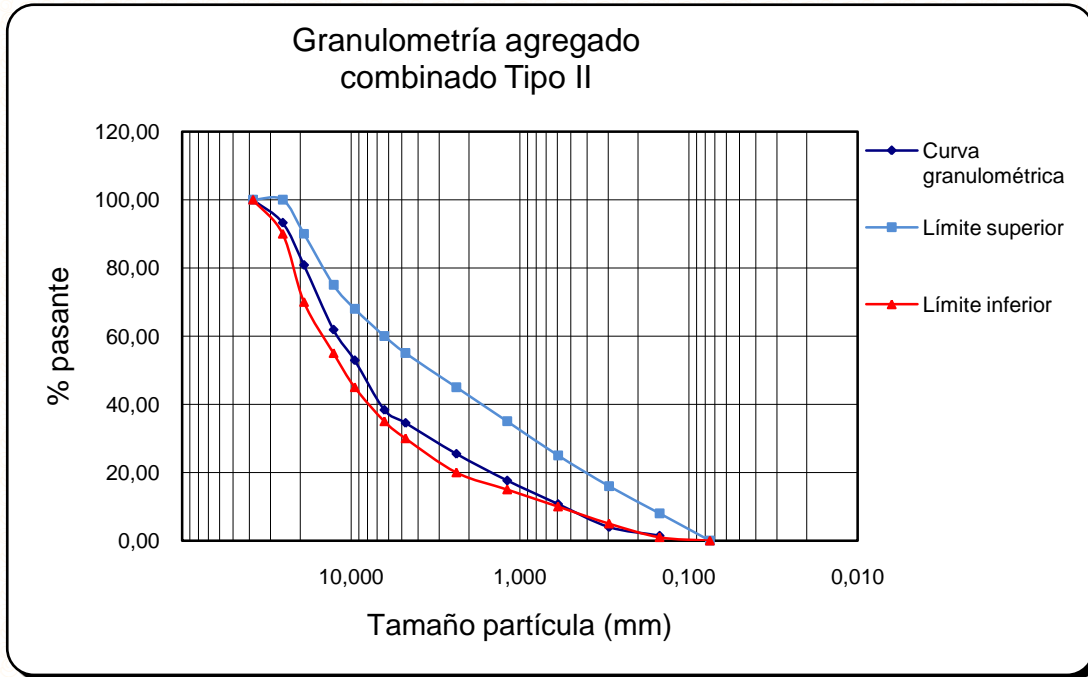


Tabla 4.6: Resultados del ensayo de granulometría del agregado combinado Tipo II

| Granulometría agregado combinado Tipo II |                       |                    |            |             |           |                 |                 |
|--|-----------------------|--------------------|------------|-------------|-----------|-----------------|-----------------|
| Tamiz                                    | Tamaño partícula (mm) | Peso retenido (gr) | % retenido | % acumulado | % pasante | Límite superior | Límite inferior |
| 1 1/2"                                   | 38,100                | 0                  | 0,00       | 0,00        | 100,00    | 100             | 100             |
| 1"                                       | 25,400                | 1352               | 6,76       | 6,76        | 93,24     | 100             | 90              |
| 3/4"                                     | 19,000                | 2480               | 12,40      | 19,16       | 80,84     | 90              | 70              |
| 1/2"                                     | 12,700                | 3793               | 18,97      | 38,13       | 61,88     | 75              | 55              |
| 3/8"                                     | 9,510                 | 1794               | 8,97       | 47,10       | 52,91     | 68              | 45              |
| 1/4"                                     | 6,350                 | 2908               | 14,54      | 61,64       | 38,37     | 60              | 35              |
| Nº 4                                     | 4,760                 | 50                 | 3,84       | 65,47       | 34,53     | 55              | 30              |
| Nº 8                                     | 2,380                 | 118                | 9,05       | 74,53       | 25,47     | 45              | 20              |
| Nº 16                                    | 1,190                 | 102                | 7,83       | 82,35       | 17,65     | 35              | 15              |
| Nº 30                                    | 0,595                 | 90                 | 6,91       | 89,26       | 10,74     | 25              | 10              |
| Nº 50                                    | 0,297                 | 88                 | 6,75       | 96,01       | 3,99      | 16              | 5               |
| Nº 100                                   | 0,149                 | 33                 | 2,53       | 98,54       | 1,46      | 8               | 1               |
| Nº 200                                   | 0,075                 | 11                 | 0,84       | 99,39       | 0,61      | -               | -               |

Tamaño máximo nominal= 1"

Gráfico N°6: Curva granulométrica del agregado combinado Tipo II



La calidad granulométrica de los agregados es variable, más aún cuando se toman los agregados de procesos de reciclaje de materiales de construcción, donde la granulometría y tamaño máximo del agregado dependen del nivel de clasificación y planificación en la obra o planta donde se realizan las actividades de reciclaje.

Se realizó un ensayo de granulometría combinada para cada tipo de residuo utilizado, el cual se consideró representativo de todas las muestras recogidas en la obra.

En cada ensayo se trabajó con 20 kg de muestra, los cuales se tamizaron desde el tamiz de 1 1/2" hasta el pasante del tamiz de 1/4", considerando estos retenidos como los agregados gruesos. Además, se tomaron 500 gr del pasante

del tamiz de 1/4" para realizar la granulometría de los considerados agregados finos.

El tamaño máximo nominal del agregado para cada tipo de residuo se consideró como el correspondiente a la abertura del tamiz de menor tamaño que tuviera mínimo 5% de retenido.

Los agregados Tipo I presentaron un tamaño máximo nominal más pequeño que el de los agregados Tipo II. Esto se presenta por la composición de cada agregado, ya que los agregados Tipo I contienen fracciones de ladrillo y cerámica, que son materiales frágiles y en el proceso de trituración se reducen más en tamaño que los residuos de elementos de concreto.

Los agregados se trabajaron como combinados de agregados gruesos y finos, por lo cual se tomaron los límites granulométricos de la Tabla VI.I "Límites granulométricos recomendados para distintos tamaños máximos de agregado. Porcentajes pasantes" del Manual del Concreto Estructural (Porrero, 2004).

Los residuos procesados cuarteados presentaron una gradación dentro de los límites establecidos para cada curva granulométrica. Por esto se consideró utilizar las muestras cuarteadas como agregado combinado para las mezclas de concreto.

Los agregados Tipo I en general presentan muchas partículas de madera y arcilla, se obtuvieron muchas fracciones de madera en el retenido del tamiz 1/4" y N°16. A su vez, los agregados Tipo II no presentan muchas fracciones de estos materiales.



## 4.2.2. Peso específico y absorción

### 4.2.2.1. Peso específico

Fórmula N°1: Cálculo de la densidad y absorción del agregado fino

Densidad aparente con base en muestra saturada con superficie seca=  $(d * M) / (Ma + M - Mp)$

% Absorción=  $((M - M1) / M1) * 100$

Tabla 4.7: Resultados del ensayo de peso específico y absorción del agregado fino

| Agregado fino    |           |   |                               |   |   |   |  |               |
|------------------|-----------|---|-------------------------------|---|---|---|--|---------------|
| Tipo de agregado | Nº Ensayo | Masa del picnómetro con muestra y agua hasta marca de calibración (Mp) (gr) | Densidad del agua (d) (gr/ml) | Masa de la muestra saturada con superficie seca (M)(gr) | Masa del picnómetro lleno con agua (Ma)(gr) | Masa de la muestra secada al horno (M1)(gr) | Densidad aparente con base en muestra saturada con superficie seca (gr/ml) | Absorción (%) |
| Tipo I           | 1         | 1575  | 1                             | 500   | 1290  | 444,6                                       | 2,33   | 12,46         |
|                  | 2         | 1532  | 1                             | 425   | 1290  | 375,6                                       | 2,32   | 13,15         |
| Tipo II          | 1         | 1583  | 1                             | 500   | 1290  | 465,3                                       | 2,42   | 7,46          |
|                  | 2         | 1579  | 1                             | 500   | 1290  | 450,2                                       | 2,37   | 11,06         |

Fórmula N°2: Cálculo de la densidad y absorción del agregado grueso

Densidad aparente con base en muestra saturada con superficie seca=  $(d * M2) / (M2 - M3)$

% Absorción=  $((M2 - M1) / M1) * 100$

Tabla 4.8: Resultados del ensayo de peso específico y absorción del agregado grueso

| Agregado grueso  |  |  |   |                               |  |               |
|------------------|--|--|---|-------------------------------|--|---------------|
| Tipo de agregado | Masa de la muestra en el aire secada al horno (M1)(gr) | Masa de la muestra saturada con superficie seca (M2)(gr) | Masa de la muestra saturada en agua (M3) (gr) | Densidad del agua (d) (gr/ml) | Densidad aparente con base en muestra saturada con superficie seca (gr/ml) | Absorción (%) |
| Tipo I           | 6135   | 6600   | 3759  | 1                             | 2,32   | 7,58          |
| Tipo II          | 6177   | 6500   | 3825  | 1                             | 2,43   | 5,23          |

Tabla 4.9: Resultados de peso específico y absorción del agregado combinado

| Agregado combinado (promedio agregado fino y grueso) |  |               |   |
|--|--|---------------|---|
| Tipo de agregado                                     | Densidad aparente con base en muestra saturada con superficie seca (gr/ml) | Absorción (%) | Valores usuales                                 |
|  |  |               | Densidad: 2,5 a 2,7 gr/ml<br>Absorción: 1% a 3% |
| Tipo I   | 2,32   | 11,06         | Manual del Concreto Estructural                 |
| Tipo II  | 2,41   | 7,92          |   |

El valor de peso específico para las partículas finas y gruesas de un agregado se considera igual, porque provienen del mismo material procesado.

Se realizaron dos ensayos de determinación del peso específico a las partículas finas para los dos tipos de agregados, de manera de comprobar si el valor era correcto o el ensayo no se había realizado correctamente, ya que se obtuvo en el primer resultado un valor por debajo de los usuales. El valor obtenido en el segundo ensayo fue similar al primero, por lo que se entiende que son los valores representativos del material estudiado.

Para los ensayos de las partículas gruesas se trabajó un sólo resultado para cada tipo de agregado, al obtener un valor similar al del ensayo aplicado a las partículas finas.

Los agregados Tipo II (sólo concreto) presentan un valor de peso específico mayor al de los agregados Tipo I (mezcla de materiales), debido a que están compuestos por partículas usuales (piedra y arena natural) utilizadas para la elaboración de mezclas de concreto, a diferencia de los agregados Tipo I que contienen fracciones de elementos (ladrillo y cerámica) que no son utilizados como agregados en mezclas de concreto. Los agregados Tipo I presentan el 96% del peso específico de los agregados Tipo II.

Los valores usuales de peso específico se establecen entre 2,5 y 2,7 gr/ml, por lo que los valores obtenidos de las muestras de agregados de residuos de materiales de construcción no cumplen con esta condición, ya que sus valores son el 91% de la media entre los valores establecidos.

El valor de peso específico para cada tipo de agregado que se utilizó para comparar con los valores usuales, fue el promedio entre los valores de densidad

aparente con base en muestra saturada con superficie seca de los agregados gruesos y finos.

En los agregados finos Tipo I se consiguieron fracciones de madera, algunas de plástico y anime, que se retiraron en su mayoría para medir el peso del picnómetro con la muestra. A diferencia de los agregados finos Tipo II, en los cuales no se encontraron cantidades considerables de materiales no recomendables.

Se considera que el valor de peso específico obtenido es el representativo de los agregados reciclados, los materiales no recomendables se presentan en gran cantidad sólo en las partículas finas del agregado, a su vez el valor de peso específico sigue siendo similar al valor obtenido en las partículas gruesas, por lo que una clasificación para retirar estos materiales no alteraría significativamente el resultado de peso específico.

#### **4.2.2.2. Absorción**

Los residuos de materiales de construcción presentan una alta absorción, debido a las características de los materiales que los componen.

Las partículas finas tienen un valor de absorción mayor que el de las partículas gruesas, en los dos tipos de agregados. Las partículas gruesas de los agregados Tipo II sólo alcanzan el 57% del valor de absorción obtenido de las partículas finas, a su vez las partículas gruesas de los agregados Tipo I sólo alcanzan el 60% del valor de absorción de las partículas finas de ese tipo de agregado.

Los agregados Tipo II tienen una absorción del 72% respecto al valor de absorción de los agregados Tipo I, esto se debe a la composición del material residual. Los agregados Tipo I presentan muchas fracciones de arcilla, el cual es un material que tiene mucha absorción, por lo que este tipo de agregado supera en absorción al valor de los agregados Tipo II.

El valor de absorción de los agregados que usualmente se utilizan en mezclas de concreto está entre 1% y 3%. (Porreo y otros, 2004)

Los residuos pétreos no cumplen con los valores usuales de absorción. El valor de absorción de cada tipo de agregado reciclado que se utilizó para comparar con los valores usuales, es el promedio entre los dos valores de absorción obtenidos de las partículas finas y el valor obtenido de las partículas gruesas. Se estableció un sólo valor para cada tipo de agregado ya que se trabaja con agregados combinados.

#### 4.2.3. Contenido de partículas menores de 74 micras

Tabla 4.10: Resultados del ensayo de contenido de partículas menores de 74 micras en el agregado combinado

| Tipo de agregado | Peso inicial seco (Kgf) | Peso final seco de muestra lavada (kgf) | Partículas menores de 74 micras (%) | Valor usual                     |
|------------------|-------------------------|---|-------------------------------------|---------------------------------|
| Tipo I           | 2,974                   | 2,850                                   | 4,169                               | Menos de 2%                     |
| Tipo II          | 2,500                   | 2,470                                   | 1,200                               | Manual del Concreto Estructural |



Los dos tipos de agregados de residuos de materiales de construcción presentaron diferentes porcentajes de partículas más finas que el tamiz COVENIN N° 200.

Este ensayo se realizó con muestras de cada tipo de agregado compuestas de partículas finas y gruesas. Los agregados Tipo I presentaron un porcentaje de partículas más finas que el tamiz N° 200 mayor que el porcentaje obtenido en los agregados Tipo II. Esta diferencia se presenta por la composición de los materiales residuales de cada tipo de agregado, ya que en los agregados Tipo I se encuentra una mayor cantidad de materiales frágiles (ladrillo y cerámica) que tienen una mayor reducción de tamaño en el proceso de trituración, y los agregados Tipo II están compuestos en su mayoría por agregados naturales.

Los valores usuales para agregados para mezclas de concreto son de menos del 2%, por lo que los agregados Tipo II cumplen con este requisito, mientras que los Tipo I no cumplen.

Las partículas menores de 74 micras colaboran en el mecanismo de lubricación de la mezcla de concreto junto con el cemento, a su vez pueden aumentar la retracción si se presentan en grandes cantidades.

Además, algunas de estas partículas silíceas ó arcillosas pueden producir una mejora importante en las resistencias de los concretos, mediante una acción que se conoce como puzolánica.

#### 4.2.4. Contenido de partículas menores de 20 micras

Tabla 4.11: Resultados del ensayo de contenido de partículas menores de 20 micras en el agregado fino

| Tipo de agregado | Peso de la muestra (gr) | Volumen de la capa de material en suspensión (ml) | Partículas en suspensión (%) | Valor usual                     |
|------------------|-------------------------|---|------------------------------|---------------------------------|
| Tipo I           | 500                     | 20  | 2,4                          | Menos de 3%                     |
| Tipo II          | 500                     | 20  | 2,4                          | Manual del Concreto Estructural |

Los agregados presentaron igual cantidad de partículas menores de 20 micras, por lo que ambos generan aproximadamente la misma cantidad de partículas de este tamaño en el proceso de trituración.

Los valores normativos se establecen en menos de 3% de partículas menores de 20 micras presentes en los agregados finos. Los agregados presentan valores menores, por lo tanto cumplen con los requisitos establecidos.

#### 4.2.5. Contenido de impurezas orgánicas

Tabla 4.12: Resultados del ensayo de contenido de impurezas orgánicas en el agregado fino

| Tipo de agregado | Color patrón Gardner | Requisito normativo                |
|------------------|----------------------|------------------------------------|
| Tipo I           | 1                    | Color patrón Gardner menor que N°3 |
| Tipo II          | menos de 1           | COVENIN 277                        |

El color patrón Gardner se presenta enumerado en forma creciente desde un color amarillo claro N°1 y oscureciéndose a medida que aumenta el número.

Las partículas finas de los residuos de materiales de construcción presentaron un valor bajo de contenido de impurezas orgánicas. Los agregados Tipo I resultaron con un valor de color patrón Gardner igual a N°1, y en los agregados Tipo II se obtuvo un valor menor a N°1 ya que se obtuvo un color más claro que el color patrón N°1.

Los requisitos establecidos en la Norma COVENIN 277-2000 “Concreto. Agregados. Requisitos”, para el contenido de impurezas orgánicas en los agregados finos, establece que deben tener un valor de color patrón Gardner menor que el color N°3, por lo que los residuos de materiales de construcción presentan valores permitidos para ser utilizados en mezclas de concreto.

#### 4.2.6. Peso unitario

Los valores usuales de peso unitario están establecidos para las partículas finas y para las partículas gruesas por separado. Este ensayo se realizó a muestras combinadas de cada tipo de agregado reciclado, por lo que los valores que se consideran usuales para comparar con los resultados de los ensayos, son los valores entre el mínimo y el máximo establecidos para las partículas finas y gruesas, esto valores son: de 1,4 a 1,6 kgf/ litro para peso unitario suelto y de 1,5 a 1,9 kgf/ litro para peso unitario compacto.

Tabla 4.13: Resultados del ensayo de peso unitario del agregado combinado

| Tipo de agregado | Peso muestra suelto (kg) | Volumen del recipiente (litros) | Peso muestra compacta (kg) | Peso unitario suelto (kg/litros) | Peso unitario compacto (kg/litros) | Requisito normativo  |
|------------------|--------------------------|---------------------------------|----------------------------|----------------------------------|------------------------------------|--|
| Tipo I           | 19,55                    | 14,05                           | 22,50                      | 1,39                             | 1,60                               | Suelto: 1,4 a 1,6 kgf/litro<br>Compacto: 1,5 a 1,9 kgf/litro |
| Tipo II          | 20,00                    | 14,05                           | 21,55                      | 1,42                             | 1,53                               | Manual del Concreto Estructural                              |

##### 4.2.6.1 Peso unitario suelto

Los agregados presentaron una variación pequeña en el valor de peso unitario suelto, lo que se relaciona con la pequeña diferencia entre el valor de peso específico que tiene cada uno de los agregados.

El valor de peso unitario suelto obtenido de cada tipo de agregado reciclado corresponde al valor mínimo establecido en los valores usuales para agregados para mezclas de concreto, por lo que se consideran agregados más livianos que los convencionales.

#### **4.2.6.2. Peso unitario compacto**

Los agregados presentaron una variación pequeña en el valor de peso unitario compacto, esto se relaciona con la granulometría que presenta cada tipo de agregado. Los agregados Tipo I presentaron un valor de peso unitario compacto mayor que el de los agregados Tipo II, ya que las partículas llenan más espacios en la compactación por tener una mejor distribución de tamaños.

El valor de peso unitario compacto obtenido de cada tipo de agregado reciclado se encuentra en los valores establecidos como usuales para agregados para mezclas de concreto. A su vez, son agregados más livianos que los convencionales por tener un valor bajo de peso unitario compacto.

#### **4.2.7. Contenido de vacíos en el agregado**

El contenido de vacíos se relaciona con el peso específico, peso unitario y granulometría del agregado.

Fórmula N°3: Cálculo del contenido de vacíos en el agregado combinado

$\% \text{ vacíos en el agregado} = ((\text{Peso específico} - \text{Peso unitario}) / \text{Peso específico}) * 100$



Tabla 4.14: Resultados del ensayo de contenido de vacíos en el agregado combinado

| Tipo de agregado | Peso específico (gr/ml) | Peso unitario suelto (gr/ml) | Peso unitario compacto (gr/ml) | Vacíos en el agregado suelto (%) | Vacíos en el agregado compacto (%) | Valores usuales |
|------------------|-------------------------|------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|-----------------|
| Tipo I           | 2,32                    | 1,39                         | 1,60                           | 40,09                            | 31,03                              | Sin requisito   |
| Tipo II          | 2,41                    | 1,42                         | 1,53                           | 41,08                            | 36,51                              |                 |

#### 4.2.7.1. Contenido de vacíos en el agregado suelto

Los agregados presentaron una variación pequeña en el contenido de vacíos, esto se relaciona con la pequeña diferencia de peso específico entre los tipos de agregados.

#### 4.2.7.2. Contenido de vacíos en el agregado compacto

Los agregados Tipo I presentaron menor contenido de vacíos que los agregados Tipo II, debido a que en la compactación llenan más espacios entre partículas por tener una mejor granulometría.

#### 4.2.8. Resistencia al desgaste

Tabla 4.15: Resultados del ensayo de resistencia al desgaste del agregado grueso

| Tipo de agregado | Gradación | Peso inicial (gr) | Peso final (gr) | Desgaste (%) | Requisito normativo |
|------------------|-----------|-------------------|-----------------|--------------|---------------------|
| Tipo I           | B         | 5000              | 3000            | 40           | menor ó igual a 40% |
| Tipo II          | A         | 5000              | 3500            | 30           | COVENIN 277         |

En la Norma COVENIN 266-1977 se establecen los tipos de gradación del agregado grueso, según los pesos retenidos en diferentes tamices al realizar un ensayo de granulometría.

Las partículas gruesas de los residuos pétreos de materiales de construcción presentaron un valor alto de desgaste. La cantidad de muestra que se ensayó para cada tipo de agregado fue de 5 kg, distribuidos según la granulometría del agregado.

La granulometría de los agregados indicó que los agregados Tipo I tienen una gradación tipo B y los agregados Tipo II una gradación tipo A.

Los agregados Tipo I presentaron un desgaste de 40% y los Tipo II de 30%, lo cual les permite cumplir con el requisito establecido en la Norma COVENIN 266-1977 "Método de ensayo para determinar la resistencia al desgaste en agregados gruesos de menores de 38,1 mm (1 1/2") por medio de la máquina de Los Ángeles", de tener un desgaste igual ó menor al 40%.

A su vez, se considera que los agregados Tipo I presentan un desgaste mayor por estar compuestos por materiales más frágiles que los agregados Tipo II.

#### 4.2.9. Contenido de cloruros y sulfatos

Tabla 4.16: Resultados del ensayo de contenido de cloruros y sulfatos en el agregado fino

| Tipo de agregado | Peso de muestra (gr) | Contenido de cloruros respecto a muestra patrón | Contenido de sulfatos respecto a muestra patrón | Contenido de cloruros (%) | Contenido de sulfatos (%) | Requisito normativo                              |
|------------------|----------------------|---|---|---------------------------|---------------------------|--|
| Tipo I           | 100                  | menor   | igual   | 0,01                      | 0,011                     | Cloruros:<br>máx 0,1 %<br>Sulfatos:<br>máx 1,0 % |
| Tipo II          | 100                  | menor   | igual   | 0,01                      | 0,011                     | COVENIN<br>277                                   |

Tabla 4.17: Contenido de cloruros y sulfatos en el agua común

| Muestra patrón | Contenido de cloruros (mg/litro) | Contenido de sulfatos (mg/litro) |
|----------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Agua común     | 10                               | 11                               |

El ensayo de contenido de cloruros y sulfatos se realizó de manera cualitativa, se preparó una muestra de cada tipo de agregado y una muestra patrón de agua, con la que se comparó cualitativamente el precipitado formado al acidificarlas con las soluciones respectivas para determinar cloruros y sulfatos.

Las muestras de cada tipo de agregado se realizaron con agregado fino. Las soluciones que se utilizaron para la determinación de cloruros fueron ácido nítrico al 5% y nitrato de plata, para la determinación de sulfatos se utilizó ácido clorhídrico al 5% y cloruro de bario.

En la determinación de cloruros la muestra patrón presentó partículas blancas y azuladas, y las muestras de agregados presentaron muy pocas. A su vez, en la determinación de sulfatos las muestras de agregados presentaron muy pocas partículas al igual que la muestra de comparación.

Con los resultados cualitativos se consideró que los agregados contienen cantidades similares de cloruros y menores respecto al agua común, a su vez los sulfatos se encuentran en pequeñas cantidades y similares respecto al agua común.

Los valores normativos de contenido de cloruros y sulfatos se establecen en máximo 0,1% de cloruros y máximo 1% de sulfatos.

Los valores que se utilizaron para comparar con los normativos son los valores de contenido de cloruros y sulfatos en el agua común para el momento de los ensayos, estos son de 10 mg/litro de cloruros y 11 mg/litro de sulfatos. Esta información se consiguió en la Planta Experimental de Tratamiento de Aguas de la Universidad Central de Venezuela.

La muestra patrón cumple con los valores normativos. Los agregados presentaron cantidades de cloruros y sulfatos menores ó similares, por lo que también se encuentran entre los valores normativos.

#### 4.2.10. Contenido de humedad

Tabla 4.18: Resultados del ensayo de contenido de humedad en el agregado combinado

| Tipo de agregado | Peso inicial (gr) | Peso final (gr) | Contenido de humedad total (%) | Valores usuales |
|------------------|-------------------|-----------------|--------------------------------|-----------------|
| Tipo I           | 345,71            | 318,95          | 8,39                           | Sin requisito   |
| Tipo II          | 244,21            | 230,06          | 6,15                           |                 |

Este ensayo se realizó antes de la preparación de las mezclas, para conocer la humedad que presentaban los agregados y hacer la corrección por humedad y absorción de la dosificación de las mezclas de concreto diseñadas.

### 4.3. Resultados y análisis aplicados a las mezclas de concreto elaboradas con residuos pétreos de materiales de construcción

#### 4.3.1. Diseños de mezcla

##### 4.3.1.1. Cálculo tipo de un diseño de mezcla de concreto

Datos:

- $F_c = 210 \text{ kgf/cm}^2$
- Control de Calidad: Excelente



- Condición de Servicio: Atmósfera Común (La relación agua cemento máxima es de 0,75. Según Tabla VI.9 del “Manual del Concreto Estructural”), (Porrero,2004)
- Asentamiento = 8 cm
- Tipo de agregado: Tipo I (Residuos pétreos)
- Tamaño Máximo: 3/4”
- Peso Específico:  $\gamma = 2,32$

- Cuando el valor de la desviación estándar es desconocido, debe utilizarse la siguiente tabla:

Tabla VI.5: Resistencia promedio a la compresión requerida,  $F_{cr}$ , cuando no se dispone de datos para establecer la desviación estándar

| Resistencia a la compresión $F_c$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Resistencia requerida a la compresión $F_{cr}$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) |                               |                        |
|--|---|-------------------------------|------------------------|
|  | Control de calidad excelente  | Control de calidad intermedio | Sin control de calidad |
| Menor de 210   | $F_c + 45$  | $F_c + 80$                    | $F_c + 130$            |
| De 210 a 350   | $F_c + 60$  | $F_c + 95$                    | $F_c + 170$            |
| Más de 350   | $F_c + 75$  | $F_c + 110$                   | $F_c + 210$            |

Fuente: Porrero, 2004

Según los datos que se tienen, la formula a utilizar para calcular la resistencia requerida a compresión ( $F_{cr}$ ), es la siguiente:

Fórmula a):

$$F_{CR} = F_C + 60$$

$$F_{CR} = 210 \text{ kgf/cm}^2 + 60$$

Resultando como resistencia a la compresión requerida:

$$F_{CR} = 270 \text{ kgf/cm}^2$$

- Se calcula el valor de  $\alpha$  de la siguiente forma:

Fórmula b):

$$\alpha = 3,147 - 1,065 \times \text{Log} (F_{CR})$$

$$\alpha = 3,147 - 1,065 \times \text{Log} (270)$$

$$\alpha = 0,56$$

- El valor de  $\alpha$  debe ser corregido mediante dos factores que se obtiene de las Tablas VI.7 y VI.8, dichas tablas son:

Tabla VI.7:  $K_R$  factor para corregir  $\alpha$  por tamaño máximo, mm (pulgadas)

|           |      |      |      |      |      |        |      |        |      |
|-----------|------|------|------|------|------|--------|------|--------|------|
| Tamaño    | 6,35 | 9,53 | 12,7 | 19,1 | 25,4 | 38,1   | 50,8 | 63,5   | 76,2 |
| Máximo    | 1/4" | 3/8" | 1/2" | 3/4" | 1"   | 1 1/2" | 2"   | 2 1/2" | 3"   |
| Factor KR | 1,6  | 1,3  | 1,1  | 1,05 | 1    | 0,91   | 0,82 | 0,78   | 0,74 |

Fuente: Porrero, 2004

Tabla VI.8:  $K_A$  factor para corregir  $\alpha$  por tipo de agregado

| Gruesos / Finos | Triturados | Semitriturados | Canto Rodado (Grava natural) |
|-----------------|------------|----------------|------------------------------|
| Arena natural   | 1          | 0,97           | 0,91                         |
| Arena triturada | 1,14       | 1,1            | 0,93                         |

Fuente: Porrero, 2004

Los valores obtenidos de las tablas son  $K_A=1,14$  y  $K_R=1,05$ , de esta manera el valor de  $\alpha$  corregido se calcula de la siguiente forma:

Fórmula c):

$$\alpha_C = \alpha * K_R * K_A = 0,56 * 1,05 * 1,14$$

$$\alpha_C = 0,67$$

El valor de diseño de  $\alpha$  debe ser el más bajo entre el  $\alpha$  necesario por resistencia estructural y el requerido por condiciones de servicio:

$$\alpha_D = 0,67$$

- Ahora se procede a calcular la dosis de cemento, utilizando la siguiente formula:

Fórmula d):

$$C = 117,2 * (T)^{0,16} / (\alpha)^{1,3}$$

$$C = 117,2 * (8 \text{ cm})^{0,16} / (0,67)^{1,3}$$

$$C = 275,12 \text{ kgf/cm}^2$$

- Es necesario corregir la dosis de cemento, para esto se necesitan dos factores de corrección que provienen de las siguientes tablas:

Tabla VI.11:  $C_1$  factor para corregir C (cemento) por tamaño máximo, mm (pulgadas)

|              |      |      |      |      |      |        |      |        |      |
|--------------|------|------|------|------|------|--------|------|--------|------|
| Tamaño       | 6,35 | 9,53 | 12,7 | 19,1 | 25,4 | 38,1   | 50,8 | 63,5   | 76,2 |
| Máximo       | 1/4" | 3/8" | 1/2" | 3/4" | 1"   | 1 1/2" | 2"   | 2 1/2" | 3"   |
| Factor $C_1$ | 1,33 | 1,2  | 1,14 | 1,05 | 1    | 0,93   | 0,88 | 0,85   | 0,82 |

Fuente: Porrero, 2004

Tabla VI.12:  $C_2$  factor para corregir C (cemento) por tipo de agregado

| Gruesos / Finos | Triturados | Semitriturados | Canto Rodado (Grava natural) |
|-----------------|------------|----------------|------------------------------|
| Arena natural   | 1          | 0,93           | 0,9                          |
| Arena triturada | 1,28       | 1,23           | 0,96                         |

Fuente: Porrero, 2004

Los valores obtenidos de las tablas son  $C_1=1,05$  y  $C_2=1,28$ , de esta manera el valor de C corregido se calcula de la siguiente forma:

Fórmula e):

$$C_C = C * C_1 * C_2$$

$$C_C = 275,12 * 1,05 * 1,28$$

$$C_C = 370 \text{ kgf/cm}^2$$

El valor del Cemento en litros se obtiene de la siguiente manera:

Fórmula f):

$$C_D = C_C * 0,3$$

$$C_D = 111 \text{ litros/m}^3$$

- El Volumen de aire atrapado se calcula de esta forma:

Fórmula g):

$$V = C_C / P \quad \text{donde P: Tamaño máximo (mm)}$$

$$V = 370 / 19,1$$

$$V = 19 \text{ litros/m}^3$$

- Calculando la cantidad de agua necesaria:

Fórmula h):

$$a = C_C * \alpha$$

$$a = 370 * 0,67$$

$$a = 247 \text{ litros/m}^3$$

- Cantidad de Agregados Gruesos y Finos:

Fórmula i):

$$A + G = \gamma * (1000 - 0,3 * C_C - a - V)$$



$$A + G = 2,32 * (1000 - 0,3*370 - 247 - 19)$$

$$\mathbf{A + G = 1445 \text{ kgf/m}^3}$$

-Es necesario corregir la dosificación por humedad y absorción de los agregados en el momento de preparación de la mezcla, utilizando las siguientes fórmulas:

Fórmula j):

$$A + G \text{ corregido} = (A + G) * (100 + w) / (100 + Ab)$$

Donde w: contenido de humedad (%)

Ab: absorción (%)

Fórmula k):

$$a \text{ corregida} = a + (A + G) - (A + G \text{ corregido})$$

$$w = 8,39\%$$

$$Ab = 11,06\%$$

$$A + G \text{ corregido} = 1445 * (100 + 8,39) / (100 + 11,06)$$

$$\mathbf{A + G \text{ corregido} = 1411 \text{ kgf/m}^3}$$

$$a \text{ corregida} = 247 + 1445 - 1411$$

$$\mathbf{a \text{ corregida} = 281 \text{ litros/ m}^3}$$

#### 4.3.1.2. Resultados de las mezclas diseñadas

Las mezclas de concreto se diseñaron con los siguientes datos:

- Control de Calidad: Excelente
- Condición de Servicio: Atmósfera común (La relación agua cemento máxima es de 0,75. Según Tabla VI.9 del “Manual del Concreto Estructural”), (Porrero, 2004)
- Asentamiento = 8 cm
- Tipo de agregado: Finos: arena triturada  
Gruesos: triturados
- Tamaño máximo: Agregado Tipo I: 3/4”  
Agregado Tipo II: 1”
- Peso específico: Agregado Tipo I: 2,32 gr/ml  
Agregado Tipo II: 2,41 gr/ml

Tabla 4.19: Contenido de humedad y absorción de los agregados

| Tipo de agregado | Contenido de humedad (%) | Absorción (%) |
|------------------|--------------------------|---------------|
| Tipo I           | 8,39                     | 11,06         |
| Tipo II          | 6,15                     | 7,92          |

Con la aplicación del método de diseño de mezclas de concreto del Manual del Concreto Estructural (Porrero, 2004), se obtuvieron los siguientes diseños de mezcla:

Tabla 4.20: Dosificación de mezclas de concreto diseñadas

Para un Concreto de Resistencia igual a  $210 \text{ kgf/cm}^2$ , compuesto por agregados Tipo I, se necesita la siguiente dosificación:

| <b>Componente</b> | <b>Peso (<math>\text{kgf/m}^3</math>)</b> | <b>Volumen Absoluto (<math>\text{l/m}^3</math>)</b> | <b>Peso corregido por humedad y absorción (<math>\text{kgf}/0,08 \text{ m}^3</math>)</b> |
|-------------------|---|---|--|
| Cemento           | 370                                       | 111   | 30   |
| Agua              | 247                                       | 247   | 23   |
| Agregados (A+G)   | 1445                                      | 623   | 113  |
| <b>TOTAL</b>      | 2062                                      | 981   | 165  |

Para un Concreto de Resistencia igual a  $250 \text{ kgf/cm}^2$ , compuesto por agregados Tipo I, se necesita la siguiente dosificación:

| <b>Componente</b> | <b>Peso (<math>\text{kgf/m}^3</math>)</b> | <b>Volumen Absoluto (<math>\text{l/m}^3</math>)</b> | <b>Peso corregido por humedad y absorción (<math>\text{kgf}/0,11 \text{ m}^3</math>)</b> |
|-------------------|---|---|--|
| Cemento           | 436                                       | 131   | 48   |
| Agua              | 258                                       | 258   | 28   |
| Agregados (A+G)   | 1365                                      | 588   | 150  |
| <b>TOTAL</b>      | 2059                                      | 977   | 226  |

Para un Concreto de Resistencia igual a 280 kgf/cm<sup>2</sup>, compuesto por agregados Tipo I, se necesita la siguiente dosificación:

| <b>Componente</b> | <b>Peso (kgf/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Volumen Absoluto (l/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Peso corregido por humedad y absorción (kgf/0,10 m<sup>3</sup>)</b> |
|-------------------|---------------------------------|---|--|
| Cemento           | 489                             | 147                                       | 49   |
| Agua              | 264                             | 264                                       | 26   |
| Agregados (A+G)   | 1307                            | 563                                       | 131  |
| <b>TOTAL</b>      | 2060                            | 974                                       | 206  |

Para un Concreto de Resistencia igual a 210 kgf/cm<sup>2</sup>, compuesto por agregados Tipo II, se necesita la siguiente dosificación:

| <b>Componente</b> | <b>Peso (kgf/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Volumen Absoluto (l/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Peso corregido por humedad y absorción (kgf/0,09 m<sup>3</sup>)</b> |
|-------------------|---------------------------------|---|--|
| Cemento           | 374                             | 112                                       | 34   |
| Agua              | 239                             | 239                                       | 22   |
| Agregados (A+G)   | 1528                            | 634                                       | 138  |
| <b>TOTAL</b>      | 2141                            | 985                                       | 193  |

Para un Concreto de Resistencia igual a 250 kgf/cm<sup>2</sup>, compuesto por agregados Tipo II, se necesita la siguiente dosificación:

| <b>Componente</b> | <b>Peso (kgf/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Volumen Absoluto (l/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Peso corregido por humedad y absorción (kgf/0,10 m<sup>3</sup>)</b> |
|-------------------|---------------------------------|---|--|
| Cemento           | 445                             | 133                                       | 45   |
| Agua              | 249                             | 249                                       | 25   |
| Agregados (A+G)   | 1446                            | 600                                       | 145  |
| <b>TOTAL</b>      | <b>2140</b>                     | <b>982</b>                                | <b>214</b>   |

Para un Concreto de Resistencia igual a 280 kgf/cm<sup>2</sup>, compuesto por agregados Tipo II, se necesita la siguiente dosificación:

| <b>Componente</b> | <b>Peso (kgf/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Volumen Absoluto (l/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Peso corregido por humedad y absorción (kgf/0,10 m<sup>3</sup>)</b> |
|-------------------|---------------------------------|---|--|
| Cemento           | 502                             | 151                                       | 50   |
| Agua              | 256                             | 256                                       | 26   |
| Agregados (A+G)   | 1382                            | 573                                       | 138  |
| <b>TOTAL</b>      | <b>2140</b>                     | <b>980</b>                                | <b>214</b>   |



#### 4.3.2. Preparación de las mezclas de concreto diseñadas

Para la preparación de las mezclas se realizó la corrección por humedad y absorción de los agregados, a la dosificación de las mezclas diseñadas. El valor de absorción de los agregados se obtuvo en la aplicación del ensayo de determinación de la densidad y la absorción de los agregados. A su vez, el valor de humedad se obtuvo al aplicar el ensayo de contenido de humedad del agregado en el momento de la preparación de las mezclas.



Foto N°10: Ilustración de la dosificación de agregados y cemento de la mezcla de  $210 \text{ kgf/cm}^2$ , con agregados Tipo I



Foto N°11: Ilustración de la dosificación de agregados y cemento de la mezcla de  $280 \text{ kgf/cm}^2$ , con agregados Tipo II

Se necesitaban elaborar 14 probetas cilíndricas para cada mezcla, para realizar los ensayos de resistencia a la compresión simple, resistencia a la tracción indirecta y módulo de elasticidad secante. Cada probeta cilíndrica tiene un volumen aproximado de 5 litros, por lo que se decidió preparar 80 litros de mezcla, considerando una pérdida de 10 litros de mezcla en la mezcladora.



Foto N°12: Ilustración de probetas cilíndricas de la mezcla de resistencia de 250 kgf/cm<sup>2</sup>, con agregados Tipo II

Al preparar la primera y segunda mezcla se tuvo escasez de mezcla para elaborar todas las probetas cilíndricas. Las siguientes mezclas se prepararon con volúmenes mayores hasta conseguir un valor óptimo que permitiera elaborar las probetas cilíndricas completas, los volúmenes preparados de cada mezcla fueron los siguientes:

Tabla 4.21: Volumen de las mezclas preparadas

| Tipo de agregado | Resistencia de diseño (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Volumen de mezcla preparado (m <sup>3</sup> ) |
|------------------|--|---|
| Tipo I           | 210  | 0,08  |
| Tipo II          | 210  | 0,09  |
| Tipo I           | 250  | 0,11  |
| Tipo II          | 250  | 0,10  |
| Tipo I           | 280  | 0,10  |
| Tipo II          | 280  | 0,10  |

Las mezclas de concreto preparadas con resistencia de diseño de 210 kgf/cm<sup>2</sup> tuvieron un volumen de mezcla que permitió elaborar sólo 12 probetas cilíndricas, las cuales se distribuyeron para los ensayos de la siguiente manera:

Tabla 4.22: Distribución de las probetas cilíndricas para los ensayos de una mezcla de resistencia de diseño de 210 kgf/cm<sup>2</sup>, por escasez de mezcla

| Ensayo                              | N° probetas/ edad de ensayo |         |
|-------------------------------------|-----------------------------|---------|
|                                     | 7 días                      | 28 días |
| Módulo de elasticidad               | -                           | 2       |
| Resistencia a la compresión         | 2                           | 3       |
| Resistencia a la tracción indirecta | 2                           | 3       |

#### 4.3.3. Asentamiento

Tabla 4.23: Resultados del ensayo de asentamiento

| Tipo de agregado | Resistencia de diseño (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Asentamiento (cm) |
|------------------|--|-------------------|
| Tipo I           | 210  | 3                 |
|                  | 250  | 8,5               |
|                  | 280  | 14                |
| Tipo II          | 210  | 5                 |
|                  | 250  | 9                 |
|                  | 280  | 18                |

Los valores de asentamiento resultaron mayores a medida que aumentaba la resistencia de diseño. A su vez, las mezclas de cada tipo de agregado con un mismo valor de resistencia presentaron valores de asentamiento similares.

En los resultados de diseño de las mezclas se presenta que la dosificación de agua y cemento aumenta y la de los agregados disminuye a medida que la

resistencia de diseño es mayor, lo que representa un mayor contenido de pasta y resulta un concreto más manejable.

Este ensayo se aplica al terminar el proceso de mezclado, al considerar que los agregados absorbieron ó agregaron agua a la mezcla durante ese proceso, ya que los agregados convencionales tienen valores muy bajos de absorción. Por el contrario, los residuos pétreos de materiales de construcción tienen un valor alto de absorción por lo que se considera que los tiempos de mezclado deben ser mayores que los de mezclas con agregados convencionales, para permitir que los agregados absorban el agua que se agregó por la corrección de absorción y se logren resultados más precisos en el ensayo de asentamiento del cono de Abrams.

Las mezclas correspondientes a resistencia de  $250 \text{ kgf/cm}^2$  presentaron un asentamiento aproximado al de diseño de 8 cm, se considera que es la mezcla que tiene una mejor proporción entre los componentes respecto al alto valor de absorción de los agregados, donde los tiempos de mezclado presentan un mejor ajuste a los convencionales.



#### 4.3.4. Resistencia a la compresión simple



Foto N°13: Ilustración del ensayo de la colocación de las probetas cilíndricas para realizar el ensayo de resistencia a la compresión simple

#### 4.3.4.1. Características de las probetas ensayadas



Foto N°14: Ilustración de las probetas de la mezcla de resistencia de diseño  $f_c=280 \text{ kgf/cm}^2$ , con agregados Tipo II, edad de ensayo a los 28 días

Tabla 4.24: Características de las probetas de concreto ensayadas a compresión

| Tipo de agregado | Resistencia de diseño a los 28 días (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Edad de ensayo (días) | Características de las probetas TIPO I |               |                        |             |                      |            |
|------------------|--|-----------------------|--|---------------|------------------------|-------------|----------------------|------------|
|                  |  |                       | Nº Probeta                             | Diámetro (cm) | Diámetro promedio (cm) | Altura (cm) | Altura promedio (cm) | Peso (kgf) |
| Tipo I           | 210  | 7                     | 1                                      | 14,93         | 14,96                  | 30,10       | 30,08                | 10,910     |
|                  |  |                       |  | 14,96         |                        | 30,10       |                      |            |
|                  |  |                       |  | 15,00         |                        | 30,05       |                      |            |
|                  |  |                       | 2                                      | 15,00         | 14,98                  | 30,11       | 30,09                |            |
|                  |  |                       |  | 14,97         |                        | 30,07       |                      |            |
|                  |  |                       |  | 14,98         |                        | 30,10       |                      |            |
|                  |  | 28                    | 1                                      | 15,02         | 14,96                  | 30,27       | 30,20                |            |
|                  |  |                       |  | 14,96         |                        | 30,17       |                      |            |
|                  |  |                       |  | 14,91         |                        | 30,15       |                      |            |
|                  |  |                       | 2                                      | 14,89         | 14,92                  | 30,16       | 30,13                |            |
|                  |  |                       |  | 14,90         |                        | 30,10       |                      |            |
|                  |  |                       |  | 14,96         |                        | 30,12       |                      |            |
|                  |  |                       | 3                                      | 14,93         | 14,93                  | 30,07       | 30,05                |            |
|                  |  |                       |  | 14,94         |                        | 30,00       |                      |            |
|                  |  |                       |  | 14,93         |                        | 30,09       |                      |            |

| Tipo de agregado | Resistencia de diseño a los 28 días (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Edad de ensayo (días) | Características de las probetas TIPO I |               |                        |             |                      |            |
|------------------|--|-----------------------|--|---------------|------------------------|-------------|----------------------|------------|
|                  |  |                       | Nº Probeta                             | Diámetro (cm) | Diámetro promedio (cm) | Altura (cm) | Altura promedio (cm) | Peso (kgf) |
| Tipo I           | 250  | 7                     | 1                                      | 14,86         | 14,95                  | 30,15       | 30,18                | 11,100     |
|                  |  |                       |  | 14,93         |                        | 30,06       |                      |            |
|                  |  |                       |  | 15,07         |                        | 30,34       |                      |            |
|                  |  |                       | 2                                      | 14,91         | 14,94                  | 30,14       | 30,12                |            |
|                  |  |                       |  | 14,95         |                        | 30,06       |                      |            |
|                  |  |                       |  | 14,95         |                        | 30,15       |                      |            |
|                  |  | 3                     | 15,05                                  | 15,01         | 30,32                  | 30,31       |                      |            |
|                  |  |                       | 15,00                                  |               | 30,32                  |             |                      |            |
|                  |  |                       | 14,97                                  |               | 30,28                  |             |                      |            |
|                  |  | 28                    | 1                                      | 15,00         | 15,01                  | 29,65       | 29,38                |            |
|                  |  |                       |  | 15,05         |                        | 29,00       |                      |            |
|                  |  |                       |  | 14,99         |                        | 29,50       |                      |            |
|                  |  |                       | 2                                      | 14,90         | 14,96                  | 29,65       | 29,68                |            |
|                  |  |                       |  | 15,00         |                        | 30,00       |                      |            |
|                  |  |                       |  | 14,97         |                        | 29,40       |                      |            |
| 3                | 14,90  |                       | 14,95                                  | 30,14         | 30,12                  |             |                      |            |
|                  | 14,96  |                       |  | 30,13         |                        |             |                      |            |
|                  | 14,99  |                       |  | 30,10         |                        |             |                      |            |

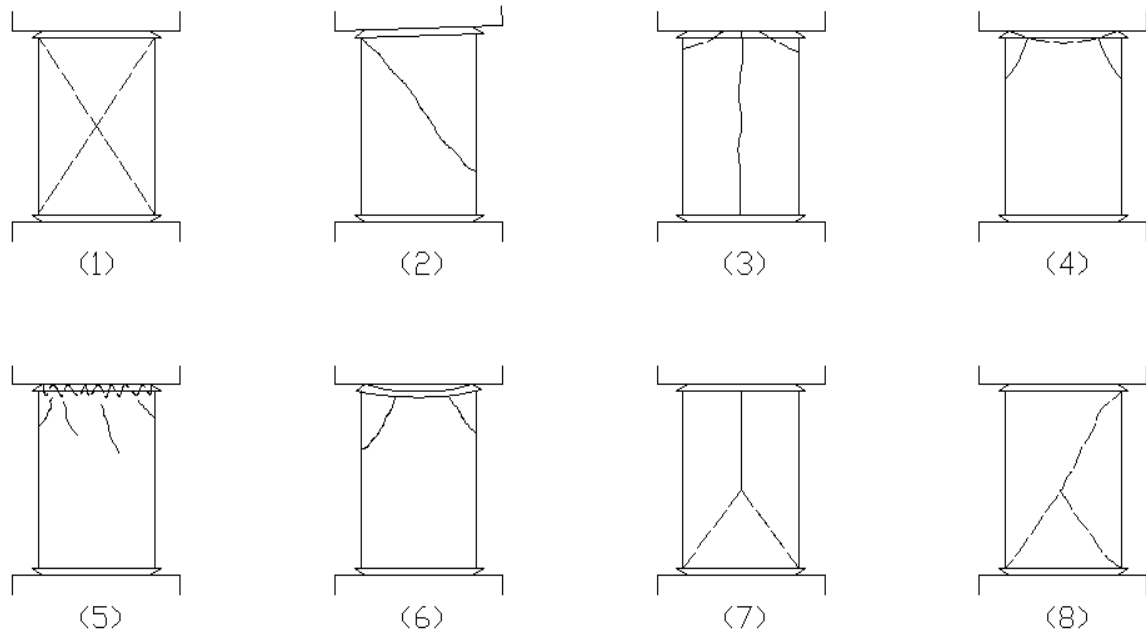
| Tipo de agregado | Resistencia de diseño a los 28 días (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Edad de ensayo (días) | Características de las probetas TIPO I |               |                        |             |                      |            |        |
|------------------|--|-----------------------|--|---------------|------------------------|-------------|----------------------|------------|--------|
|                  |  |                       | Nº Probeta                             | Diámetro (cm) | Diámetro promedio (cm) | Altura (cm) | Altura promedio (cm) | Peso (kgf) |        |
| Tipo I           | 280  | 7                     | 1                                      | 14,95         | 14,97                  | 30,05       | 30,05                | 11,194     |        |
|                  |  |                       |  | 14,96         |                        | 30,00       |                      |            |        |
|                  |  |                       |  | 15,00         |                        | 30,10       |                      |            |        |
|                  |  |                       | 2                                      | 14,90         | 14,95                  | 30,00       | 29,70                |            | 10,971 |
|                  |  |                       |  | 15,00         |                        | 30,05       |                      |            |        |
|                  |  |                       |  | 14,95         |                        | 29,06       |                      |            |        |
|                  |  |                       | 3                                      | 14,92         | 14,92                  | 30,12       | 30,09                |            | 10,078 |
|                  |  |                       |  | 14,92         |                        | 30,05       |                      |            |        |
|                  |  |                       |  | 14,92         |                        | 30,10       |                      |            |        |
|                  |  | 28                    | 1                                      | 14,90         | 14,94                  | 30,20       | 30,18                | 11,168     |        |
|                  |  |                       |  | 14,95         |                        | 30,15       |                      |            |        |
|                  |  |                       |  | 14,96         |                        | 30,20       |                      |            |        |
|                  |  |                       | 2                                      | 14,87         | 14,92                  | 30,05       | 30,05                | 11,196     |        |
|                  |  |                       |  | 14,95         |                        | 30,05       |                      |            |        |
|                  |  |                       |  | 14,95         |                        | 30,05       |                      |            |        |
|                  |  |                       | 3                                      | 15,00         | 14,97                  | 29,97       | 29,97                | 11,016     |        |
|                  |  |                       |  | 14,96         |                        | 30,00       |                      |            |        |
|                  |  |                       |  | 14,95         |                        | 29,95       |                      |            |        |

| Tipo de agregado | Resistencia de diseño a los 28 días (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Edad de ensayo (días) | Características de las probetas TIPO II |               |                        |             |                      |            |        |
|------------------|--|-----------------------|---|---------------|------------------------|-------------|----------------------|------------|--------|
|                  |  |                       | Nº Probeta                              | Diámetro (cm) | Diámetro promedio (cm) | Altura (cm) | Altura promedio (cm) | Peso (kgf) |        |
| Tipo II          | 210  | 7                     | 1                                       | 14,90         | 14,93                  | 30,13       | 30,09                | 11,724     |        |
|                  |  |                       |   | 14,94         |                        | 30,10       |                      |            |        |
|                  |  |                       |   | 14,95         |                        | 30,05       |                      |            |        |
|                  |  |                       | 2                                       | 14,91         | 14,94                  | 30,10       | 30,11                |            | 11,857 |
|                  |  |                       |   | 14,96         |                        | 30,10       |                      |            |        |
|                  |  |                       |   | 14,96         |                        | 30,14       |                      |            |        |
|                  |  | 28                    | 1                                       | 14,92         | 14,94                  | 29,10       | 29,27                | 11,723     |        |
|                  |  |                       |   | 14,95         |                        | 29,50       |                      |            |        |
|                  |  |                       |   | 14,94         |                        | 29,20       |                      |            |        |
|                  |  |                       | 2                                       | 15,10         | 15,01                  | 30,04       | 30,06                | 11,765     |        |
|                  |  |                       |   | 14,93         |                        | 30,10       |                      |            |        |
|                  |  |                       |   | 15,00         |                        | 30,05       |                      |            |        |
|                  |  |                       | 3                                       | 15,00         | 14,95                  | 30,00       | 30,01                | 11,519     |        |
|                  |  |                       |   | 14,93         |                        | 30,02       |                      |            |        |
|                  |  |                       |   | 14,92         |                        | 30,00       |                      |            |        |

| Tipo de agregado | Resistencia de diseño a los 28 días (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Edad de ensayo (días) | Características de las probetas TIPO II |               |                        |             |                      |            |
|------------------|--|-----------------------|---|---------------|------------------------|-------------|----------------------|------------|
|                  |  |                       | Nº Probeta                              | Diámetro (cm) | Diámetro promedio (cm) | Altura (cm) | Altura promedio (cm) | Peso (kgf) |
| Tipo II          | 250  | 7                     | 1                                       | 14,92         | 14,93                  | 30,26       | 30,26                | 11,067     |
|                  |  |                       |   | 14,94         |                        | 30,28       |                      |            |
|                  |  |                       |   | 14,93         |                        | 30,23       |                      |            |
|                  |  |                       | 2                                       | 14,90         | 14,91                  | 30,25       | 30,26                | 11,641     |
|                  |  |                       |   | 14,91         |                        | 30,25       |                      |            |
|                  |  |                       |   | 14,93         |                        | 30,28       |                      |            |
|                  |  |                       | 3                                       | 14,78         | 14,85                  | 29,98       | 30,01                | 11,436     |
|                  |  |                       |   | 14,85         |                        | 30,06       |                      |            |
|                  |  |                       |   | 14,93         |                        | 30,00       |                      |            |
|                  |  | 28                    | 1                                       | 14,91         | 14,96                  | 30,05       | 30,06                | 11,716     |
|                  |  |                       |   | 15,00         |                        | 30,05       |                      |            |
|                  |  |                       |   | 14,96         |                        | 30,08       |                      |            |
|                  |  |                       | 2                                       | 14,88         | 14,93                  | 30,03       | 30,05                | 11,700     |
|                  |  |                       |   | 14,90         |                        | 30,08       |                      |            |
|                  |  |                       |   | 15,00         |                        | 30,04       |                      |            |
|                  |  |                       | 3                                       | 14,92         | 14,95                  | 30,10       | 30,10                | 11,749     |
|                  |  |                       |   | 15,00         |                        | 30,10       |                      |            |
|                  |  |                       |   | 14,93         |                        | 30,10       |                      |            |

| Tipo de agregado | Resistencia de diseño a los 28 días (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Edad de ensayo (días) | Características de las probetas TIPO II |               |                        |             |                      |            |
|------------------|--|-----------------------|---|---------------|------------------------|-------------|----------------------|------------|
|                  |  |                       | Nº Probeta                              | Diámetro (cm) | Diámetro promedio (cm) | Altura (cm) | Altura promedio (cm) | Peso (kgf) |
| Tipo II          | 280  | 7                     | 1                                       | 14,79         | 14,94                  | 30,20       | 30,17                | 11,319     |
|                  |  |                       |   | 14,97         |                        | 30,20       |                      |            |
|                  |  |                       |   | 15,07         |                        | 30,10       |                      |            |
|                  |  |                       | 2                                       | 14,97         | 14,99                  | 30,00       | 30,02                | 11,385     |
|                  |  |                       |   | 15,05         |                        | 30,05       |                      |            |
|                  |  |                       |   | 14,96         |                        | 30,00       |                      |            |
|                  |  |                       | 3                                       | 14,90         | 14,93                  | 30,00       | 30,03                | 11,310     |
|                  |  |                       |   | 14,96         |                        | 30,00       |                      |            |
|                  |  |                       |   | 14,94         |                        | 30,10       |                      |            |
|                  |  | 28                    | 1                                       | 14,90         | 14,95                  | 30,10       | 30,10                | 11,545     |
|                  |  |                       |   | 14,96         |                        | 30,12       |                      |            |
|                  |  |                       |   | 15,00         |                        | 30,07       |                      |            |
|                  |  |                       | 2                                       | 14,90         | 14,93                  | 30,12       | 30,08                | 11,607     |
|                  |  |                       |   | 14,90         |                        | 30,07       |                      |            |
|                  |  |                       |   | 15,00         |                        | 30,06       |                      |            |
|                  |  |                       | 3                                       | 14,85         | 14,92                  | 30,15       | 30,15                | 11,319     |
|                  |  |                       |   | 14,96         |                        | 30,17       |                      |            |
|                  |  |                       |   | 14,96         |                        | 30,14       |                      |            |

Figura N°2: Formas de falla características en ensayos a compresión de cilindros de concreto



- (1) Falla deseable en compresión
- (2) Falla por inclinación en una de las caras de carga.
- (3) a (5) Falla por deficiencia en el enrase de las muestras moldeadas.
- (6) Falla por deformación del plato cabeceo.
- (7) Combinación de (1) y (3)
- (8) Combinación de (1) y (2)



#### 4.3.4.2. Resultados y análisis del ensayo a compresión simple

Tabla 4.25: Resultados obtenidos de ensayos de compresión simple a cilindros con agregados Tipo I.

| Tipo de agregado | Resistencia de diseño a los 28 días (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Edad de ensayo (días) | Características de las probetas |               |             |                             |  |   |
|------------------|--|-----------------------|---------------------------------|---------------|-------------|-----------------------------|--|---|
|                  |  |                       | Nº Probeta                      | Diámetro (cm) | Altura (cm) | Carga máxima aplicada (kgf) | Resistencia Calculada (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Resistencia promedio calculada (kgf/cm <sup>2</sup> ) |
| Tipo I           | 210  | 7                     | 1                               | 14,96         | 30,08       | 31400                       | 178,56                                       | 179   |
|                  |  |                       | 2                               | 14,98         | 30,08       | 31600                       | 179,22                                       |   |
|                  |  | 28                    | 1                               | 14,96         | 30,20       | 36600                       | 208,13                                       | 209   |
|                  |  |                       | 2                               | 14,92         | 30,13       | 35000                       | 200,28                                       |   |
|                  |  |                       | 3                               | 14,93         | 30,05       | 38400                       | 219,24                                       |   |

| Tipo de agregado | Resistencia de diseño a los 28 días (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Edad de ensayo (días) | Características de las probetas |               |             |                             |  |   |
|------------------|--|-----------------------|---------------------------------|---------------|-------------|-----------------------------|--|---|
|                  |  |                       | Nº Probeta                      | Diámetro (cm) | Altura (cm) | Carga máxima aplicada (kgf) | Resistencia Calculada (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Resistencia promedio calculada (kgf/cm <sup>2</sup> ) |
| Tipo I           | 250  | 7                     | 1                               | 14,95         | 30,18       | 32600                       | 185,63                                       | 204   |
|                  |  |                       | 2                               | 14,94         | 30,12       | 36400                       | 207,73                                       |   |
|                  |  |                       | 3                               | 15,01         | 30,31       | 38400                       | 217,11                                       |   |
|                  |  | 28                    | 1                               | 15,01         | 29,38       | 46600                       | 263,23                                       | 260   |
|                  |  |                       | 2                               | 14,96         | 29,68       | 46200                       | 262,96                                       |   |
|                  |  |                       | 3                               | 14,95         | 30,12       | 44600                       | 254,08                                       |   |

| Tipo de agregado | Resistencia de diseño a los 28 días (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Edad de ensayo (días) | Características de las probetas |               |             |                             |  |   |
|------------------|--|-----------------------|---------------------------------|---------------|-------------|-----------------------------|--|---|
|                  |  |                       | Nº Probeta                      | Diámetro (cm) | Altura (cm) | Carga máxima aplicada (kgf) | Resistencia Calculada (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Resistencia promedio calculada (kgf/cm <sup>2</sup> ) |
| Tipo I           | 280  | 7                     | 1                               | 14,97         | 30,05       | 33600                       | 190,90                                       | 202   |
|                  |  |                       | 2                               | 14,95         | 29,70       | 37200                       | 211,92                                       |   |
|                  |  |                       | 3                               | 14,92         | 30,09       | 35400                       | 202,48                                       |   |
|                  |  | 28                    | 1                               | 14,94         | 30,18       | 42800                       | 244,26                                       | 240   |
|                  |  |                       | 2                               | 14,92         | 30,05       | 41600                       | 237,83                                       |   |
|                  |  |                       | 3                               | 14,97         | 29,97       | 41800                       | 237,49                                       |   |

Tabla 4.26: Resultados Obtenidos de Ensayos de Compresión simple a cilindros con agregados Tipo II

| Tipo de agregado | Resistencia de diseño a los 28 días (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Edad de ensayo (días) | Características de las probetas |               |             |                             |  | Resistencia promedio calculada (kgf/cm <sup>2</sup> ) |
|------------------|--|-----------------------|---------------------------------|---------------|-------------|-----------------------------|--|---|
|                  |  |                       | Nº Probeta                      | Diámetro (cm) | Altura (cm) | Carga máxima aplicada (kgf) | Resistencia Calculada (kgf/cm <sup>2</sup> ) |   |
| Tipo II          | 210  | 7                     | 1                               | 14,93         | 30,09       | 41400                       | 236,48                                       | 242   |
|                  |  |                       | 2                               | 14,94         | 30,11       | 43400                       | 247,46                                       |   |
|                  |  | 28                    | 1                               | 14,94         | 29,27       | 50600                       | 288,77                                       | 282   |
|                  |  |                       | 2                               | 15,01         | 30,06       | 48600                       | 274,65                                       |   |
|                  |  |                       | 3                               | 14,95         | 30,01       | 29200                       | 166,35                                       |   |

| Tipo de agregado | Resistencia de diseño a los 28 días (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Edad de ensayo (días) | Características de las probetas |               |             |                             |  |   |
|------------------|--|-----------------------|---------------------------------|---------------|-------------|-----------------------------|--|---|
|                  |  |                       | Nº Probeta                      | Diámetro (cm) | Altura (cm) | Carga máxima aplicada (kgf) | Resistencia Calculada (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Resistencia promedio calculada (kgf/cm <sup>2</sup> ) |
| Tipo II          | 250  | 7                     | 1                               | 14,93         | 30,26       | 34200                       | 195,35                                       | 199   |
|                  |  |                       | 2                               | 14,91         | 30,26       | 34800                       | 199,22                                       |   |
|                  |  |                       | 3                               | 14,85         | 30,01       | 35200                       | 203,14                                       |   |
|                  |  | 28                    | 1                               | 14,96         | 30,06       | 43400                       | 247,02                                       | 252   |
|                  |  |                       | 2                               | 14,93         | 30,05       | 45800                       | 261,73                                       |   |
|                  |  |                       | 3                               | 14,95         | 30,10       | 43600                       | 248,38                                       |   |



| Tipo de agregado | Resistencia de diseño a los 28 días (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Edad de ensayo (días) | Características de las probetas |               |             |                             |  |   |
|------------------|--|-----------------------|---------------------------------|---------------|-------------|-----------------------------|--|---|
|                  |  |                       | Nº Probeta                      | Diámetro (cm) | Altura (cm) | Carga máxima aplicada (kgf) | Resistencia Calculada (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Resistencia promedio calculada (kgf/cm <sup>2</sup> ) |
| Tipo II          | 280  | 7                     | 1                               | 14,94         | 30,17       | 39200                       | 223,51                                       | 230   |
|                  |  |                       | 2                               | 14,99         | 30,02       | 41000                       | 232,22                                       |   |
|                  |  |                       | 3                               | 14,93         | 30,03       | 41000                       | 234,09                                       |   |
|                  |  | 28                    | 1                               | 14,95         | 30,10       | 48600                       | 276,74                                       | 281   |
|                  |  |                       | 2                               | 14,93         | 30,08       | 50600                       | 288,90                                       |   |
|                  |  |                       | 3                               | 14,92         | 30,15       | 48400                       | 276,71                                       |   |

La mayoría de los cilindros ensayados presentaron una falla por deficiencia en el enrase de las muestras moldeadas (falla 4), ver figura N° 2.

Los agregados gruesos fallaron (ladrillos y cerámicas, que son materiales arcillosos), mientras que los agregados de piedra picada, en su mayoría, no presentaron fallas. Los ladrillos y cerámicas se observaron nítidamente rotos, esto se debe a las propiedades de dichos agregados, ya que al ser arcillosos se quiebran fácilmente y no resisten las cargas aplicadas. Por otra parte, hubo una separación de la interfase mortero/agregado, es decir, algunos agregados gruesos (principalmente los arcillosos: ladrillos y cerámicas) se desprendieron de la masa de mortero dejando su huella marcada en la pasta. Es posible que esta separación mortero/agregado se deba a la elevada absorción (8%

aproximadamente) que presentan estos agregados gruesos arcillosos, ya que reseca el mortero en las zonas de contacto y ocasiona la pérdida de adherencia.

Además, estuvieron presentes las fallas 1, 2 y 3 (ver figura N° 2), que en su mayoría son fallas deseables en compresión, pero sin embargo sigue presente la deficiencia en el enrase de las muestras.



Foto N°15: Ilustración de una probeta ensayada a compresión, de la mezcla de resistencia de diseño de  $210 \text{ kgf/cm}^2$ , a la edad de ensayo de 28 días, con agregado Tipo I. El cilindro presentó una falla de tipo (4), ver figura N°2



Foto N°16: Ilustración de una probeta ensayada a compresión, de la mezcla de resistencia de diseño de  $250 \text{ kgf/cm}^2$ , a la edad de 7 días, con agregados Tipo II.  
El cilindro presentó una falla de tipo (2), ver figura N°2



Foto N°17: Ilustración de una probeta ensayada a compresión, de la mezcla de resistencia de diseño de  $280 \text{ kgf/cm}^2$ , a la edad de 28 días, con agregados Tipo II.  
El cilindro presentó una falla de tipo (1), ver figura N°2



Foto N°18: Ilustración de una probeta ensayada a compresión, de la mezcla de resistencia de diseño de 280 kgf/cm<sup>2</sup>, a la edad de 7 días, con agregados Tipo II. El cilindro presentó una falla de tipo (3), ver figura N°2

Tabla 4.27: Valores de resistencia a la compresión (estimados y obtenidos)

| Agregados Tipo I                          |   |  |
|---|---|--|
| Edad de ensayo (días)                     | Resistencia a la Compresión Estimada (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Resistencia a la Compresión Obtenida de Ensayos (kgf/cm <sup>2</sup> ) |
| 7 (estimada aprox. 60 % R <sub>28</sub> ) | 126   | 179  |
|   | 150   | 204  |
|   | 168   | 202  |
| 28  | 210   | 209  |
|   | 250   | 260  |
|   | 280   | 240  |

| <b>Agregados Tipo II</b>                  |  |   |
|---|--|---|
| <b>Edad de ensayo (días)</b>              | <b>Resistencia a la Compresión Estimada (kgf/cm<sup>2</sup>)</b> | <b>Resistencia a la Compresión Obtenida de Ensayos (kgf/cm<sup>2</sup>)</b> |
| 7 (estimada aprox. 60 % R <sub>28</sub> ) | 126  | 242   |
|   | 150  | 199   |
|   | 168  | 230   |
| 28  | 210  | 282   |
|   | 250  | 252   |
|   | 280  | 281   |

Los valores de resistencia a la compresión a los 7 días, se pueden estimar como un (40-60)% de la resistencia a los 28 días, siendo esto así, se observa que los valores de resistencia obtenidos cumplen, es decir, todos presentaron valores de resistencia mayores o iguales a los esperados.

Comparando los resultados de resistencia de las probetas cilíndricas realizadas con agregado Tipo I y las realizadas con agregado Tipo II, las probetas con agregados Tipo I resultaron ser menos resistentes que las de agregados Tipo II, esto se debe a que los agregados Tipo I poseen un mayor porcentaje de cerámicas y ladrillos que absorben gran cantidad de agua y tienen menor resistencia a cargas aplicadas.

Los cilindros realizados con agregados Tipo I y Tipo II, presentaron rotura del mortero. En los cilindros con agregados Tipo I, la rotura del mortero es debida a la presencia de arenas indebidas (arenas no utilizadas comúnmente y con presencia de algunos sucios), esto hace que la hidratación del cemento sea menor, por lo tanto, la pasta pierde resistencia y adherencia. Además, hay presencia de ultrafinos que contribuyen con la retracción, cosa que perjudica la mezcla haciendo que el cemento se quiebre más rápido, mientras que los cilindros



realizados con agregado Tipo II presentan arenas más limpias y con mayor presencia de cemento y concreto triturado, por lo que representan agregados con mayor calidad que la del cemento, superándolo y resistiendo más que este.

A la edad de 28 días, se pudo observar el aumento de resistencia esperado, los valores en su mayoría llegaron a ser los esperados, sin embargo, se deben analizar dichos resultados según los criterios de aceptación o rechazo para así obtener información acerca de sus valores de resistencia y a la vez de su comportamiento. De igual forma, observando los valores obtenidos se puede decir que ambos tipos de concreto trabajan de buena forma en cuanto a compresión.

Tabla 4.28: Relación agua/cemento de diseño y resultados de resistencia a la compresión a la edad de 7 y 28 días

| Tipo de agregado | $\alpha$ | Resistencia a la compresión 7 días(kgf/cm <sup>2</sup> ) | Resistencia a la compresión 28 días(kgf/cm <sup>2</sup> ) |
|------------------|----------|--|---|
| Convencional     | 0,45     | 270,63   | 341,11  |
|                  | 0,60     | 183,99   | 246,62  |
|                  | 0,70     | 142,25   | 198,67  |
| Tipo I           | 0,67     | 178,89   | 209,22  |
|                  | 0,59     | 203,49   | 260,09  |
|                  | 0,54     | 201,77   | 239,86  |
| Tipo II          | 0,64     | 241,97   | 281,71  |
|                  | 0,56     | 199,24   | 252,38  |
|                  | 0,51     | 229,94   | 280,78  |

Los valores correspondientes al agregado convencional se obtienen mediante la aplicación de la fórmula 6.7 para la resistencia a los 7 días, y la fórmula 6.8 para la resistencia a los 28 días, presentadas en el Manual de



Concreto Estructural (Porrero, 2004), en el capítulo IV, sección IV.5, referente a la Ley de Abrams. Las fórmulas son las siguientes:

Fórmula 6.7 (Porrero y otros, 2004):

$$R_7 = \frac{861,3}{13,1^\alpha}$$

Fórmula 6.8 (Porrero y otros, 2004):

$$R_{28} = \frac{902,5}{8,69^\alpha}$$

A su vez, los valores de relación agua/cemento correspondientes a los agregados Tipo I y Tipo II son los obtenidos en el diseño de las mezclas, y los valores de resistencia corresponden a los obtenidos en la aplicación del ensayo a compresión simple.

La mezcla Tipo II de resistencia igual a 210 kgf/cm<sup>2</sup> no se considera representativa del material en estudio, ya que en la elaboración de la mezcla no se utilizó una granulometría adecuada, esta mezcla presentaba mucha cantidad de partículas gruesas, por lo que los resultados obtenidos son mayores a los estimados. Los resultados de esta mezcla no son considerados en los cálculos relacionados a la resistencia a la compresión de concretos elaborados con residuos pétreos de materiales de construcción.

Tabla 4.29: Porcentaje de las resistencias alcanzadas a la edad de 7 y 28 días

| Resistencia de diseño a los 28 días (kgf/cm <sup>2</sup> ) | % resistencia a los 7 días agregado Tipo I | % resistencia a los 7 días agregado Tipo II | % resistencia a los 28 días agregado Tipo I | % resistencia a los 28 días agregado Tipo II |
|--|--|---|---|--|
| 210  | 85   | 115   | 100   | 134  |
| 250  | 81   | 80  | 104   | 101  |
| 280  | 72   | 82  | 86  | 100  |

En la tabla se presenta el porcentaje de la resistencia obtenida en la aplicación del ensayo de resistencia a la compresión a las mezclas con agregados Tipo I y Tipo II, respecto al valor de resistencia de diseño. El promedio de los porcentajes de resistencia obtenidos a los 7 días en mezclas elaboradas con agregados residuales, es aproximadamente de 80%, lo que significa que con la utilización estos tipos de agregados se obtienen resistencias elevadas a edades tempranas. Además, a los 28 días alcanzan aproximadamente la resistencia de diseño. (Ver Tabla 4.29)

Gráfico N°7: Resistencia a la compresión a los 7 días vs relación agua/cemento

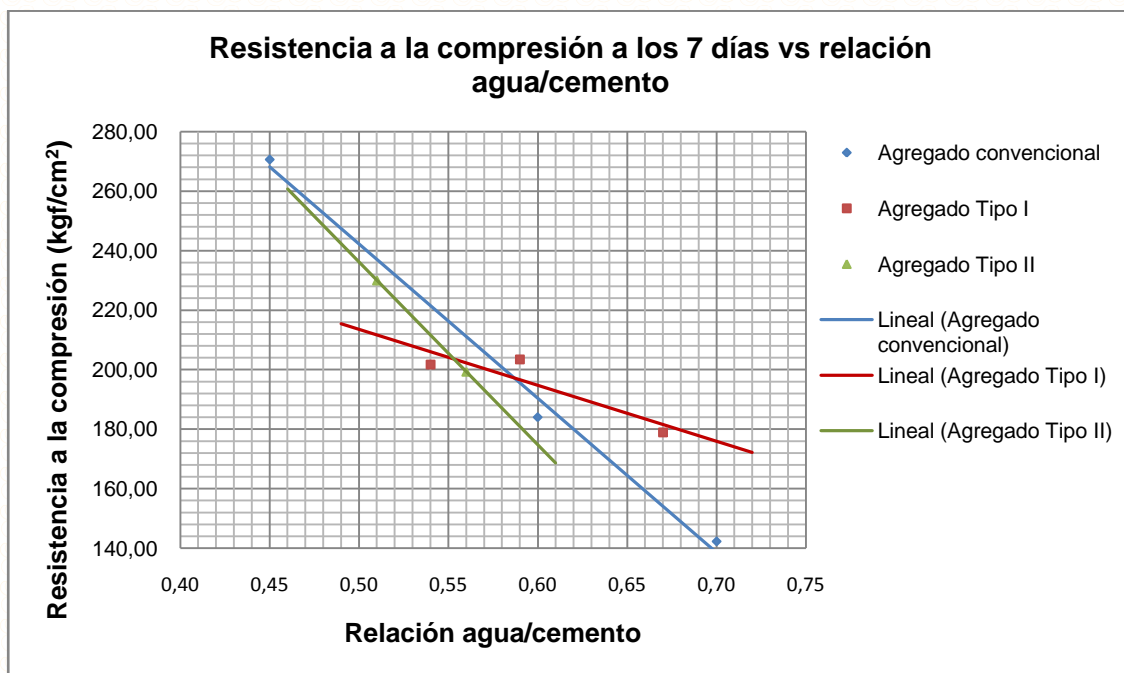
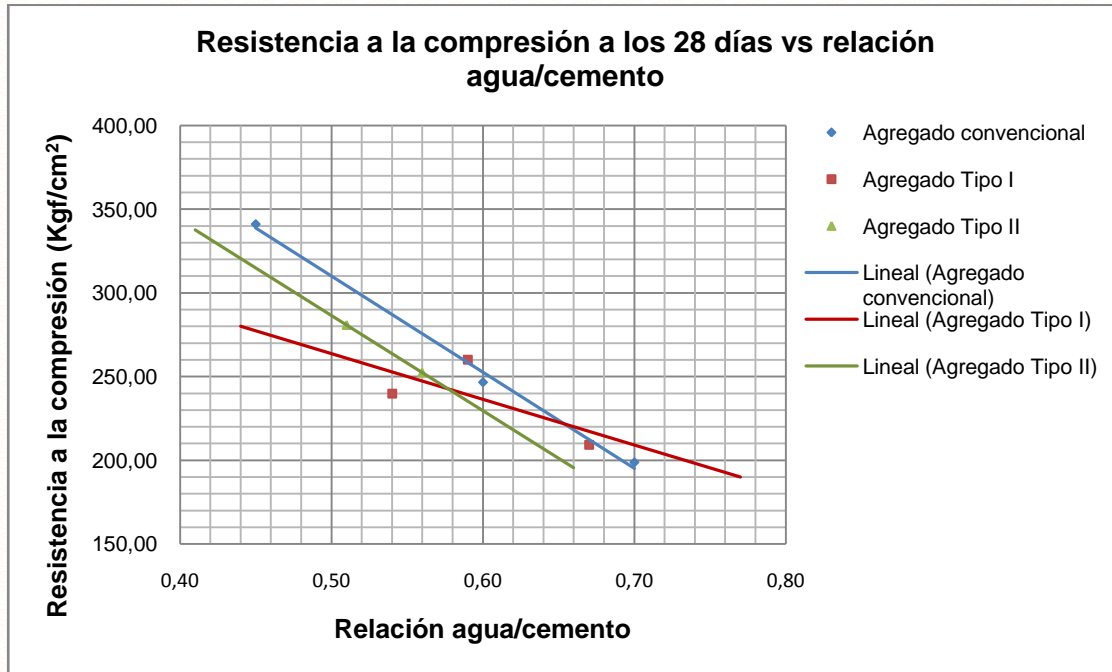


Gráfico N°8: Resistencia a la compresión a los 28 días vs relación agua/cemento



#### 4.3.4.3. Criterios de aceptación ó rechazo de valores de resistencia obtenidos mediante los ensayos de compresión simple

Para la aceptación o rechazo de los valores obtenidos de resistencia de las muestras ensayadas, se utilizaron dos criterios según la Norma COVENIN 1753-2003 “Proyecto y construcción de obras en concreto estructural”. Mediante estos criterios, se evaluaron los valores obtenidos de resistencia para así compararlos y observar si cumplen o no con la norma, de esta manera se aceptan o rechazan las muestras. Según los dos criterios utilizados, se observa que para el concreto realizado con agregados Tipo I, el mismo cumple con las resistencias de diseño de 210 kg/cm<sup>2</sup> y 250 kg/cm<sup>2</sup>, y por lo tanto con los criterios de aceptación o rechazo, sin embargo, es bueno acotar que para la resistencia de diseño de 210 kg/cm<sup>2</sup> el valor obtenido del ensayo es de 209 kg/cm<sup>2</sup>, pero se puede asumir que cumple, ya

que los cilindros no estaban perfectamente enrasados y eso afectó un poco su resistencia. Para la resistencia de diseño de  $280 \text{ kg/cm}^2$ , no cumple con ninguno de los dos criterios, por lo que se rechazan esos resultados.

Tabla 4.30: Criterio N°1 de aceptación y rechazo de los valores obtenidos de resistencia de las muestras ensayadas a compresión

| Tipo de agregado | Fc (kg/cm <sup>2</sup> ) | Edad de ensayo (días) | Fcr (kg/cm <sup>2</sup> ) | Fc - 35 | Fcr ≥ Fc - 35                   |
|------------------|--------------------------|-----------------------|---------------------------|---------|---------------------------------|
| Tipo I           | 210                      | 28                    | 209                       | 175     | Cumple Resistencia de diseño    |
|                  | 250                      | 28                    | 260                       | 215     | Cumple Resistencia de diseño    |
|                  | 280                      | 28                    | 240                       | 245     | No Cumple Resistencia de diseño |

| Tipo de agregado | Fc (kg/cm <sup>2</sup> ) | Edad de ensayo (días) | Fcr (kg/cm <sup>2</sup> ) | Fc - 35 | Fcr ≥ Fc - 35                |
|------------------|--------------------------|-----------------------|---------------------------|---------|------------------------------|
| Tipo II          | 210                      | 28                    | 282                       | 175     | Cumple Resistencia de diseño |
|                  | 250                      | 28                    | 252                       | 215     | Cumple Resistencia de diseño |
|                  | 280                      | 28                    | 281                       | 245     | Cumple Resistencia de diseño |

Tabla 4.31: Criterio N°2 de aceptación y rechazo de los valores obtenidos de resistencia de las muestras ensayadas a compresión

| Tipo de agregado | Fc (kg/cm <sup>2</sup> ) | Edad de ensayo (días) | Fcr (kg/cm <sup>2</sup> ) | Fcr ≥ Fc                      |
|------------------|--------------------------|-----------------------|---------------------------|-------------------------------|
| Tipo I           | 210                      | 28                    | 209                       | Cumple con Resistencia Diseño |
|                  | 250                      | 28                    | 260                       | Cumple con Resistencia Diseño |
|                  | 280                      | 28                    | 240                       | No Cumple Resistencia Diseño  |

| Tipo de agregado | Fc (kg/cm <sup>2</sup> ) | Edad de ensayo (días) | Fcr (kg/cm <sup>2</sup> ) | Fcr ≥ Fc                      |
|------------------|--------------------------|-----------------------|---------------------------|-------------------------------|
| Tipo II          | 210                      | 28                    | 282                       | Cumple con Resistencia Diseño |
|                  | 250                      | 28                    | 252                       | Cumple con Resistencia Diseño |
|                  | 280                      | 28                    | 281                       | Cumple con Resistencia Diseño |

En la gráfica N° 8 se puede apreciar que este concreto realizado con agregado Tipo I, tiene un valor límite de resistencia, el cual es de aproximadamente 260 kg/cm<sup>2</sup>. Por otra parte, el concreto realizado con agregados Tipo II, cumple con los valores de resistencia de diseño y por lo tanto es aceptado para resistencia de 250 kg/cm<sup>2</sup> y para 280 kg/cm<sup>2</sup>, mientras que la mezcla de 210 kg/cm<sup>2</sup> de resistencia de diseño, los valores son rechazados por no ser representativos ya que la granulometría de los agregados, en su mayoría, está compuesta por agregados gruesos, haciendo que los valores de resistencia fueran mayores a los esperados.

#### 4.3.4.4. Diseños de mezcla en base a los resultados experimentales de resistencia a la compresión. Cálculo del costo de las mezclas según dosificación

Las mezclas de concreto se diseñaron en base a un valor de resistencia a la compresión a los 28 días, con el cual se obtuvo en la gráfica N° 8 el valor de relación agua/cemento correspondiente a cada tipo de mezcla (según tipo de agregado). Las mezclas se diseñaron con los siguientes datos:

- Control de Calidad: Excelente
- Condición de Servicio: Atmósfera común (La relación agua cemento máxima es de 0,75. Según Tabla VI.9 del “Manual del Concreto Estructural”), (Porrero, 2004)
- Asentamiento = 8 cm
- Tipo de agregado:
  - Finos: arena triturada
  - Gruesos: triturados
- Tamaño máximo= 1”
- Peso específico:
  - Agregado Tipo I: 2,32 gr/ml
  - Agregado Tipo II: 2,41 gr/ml
  - Agregado Convencional: 2,65 gr/ml
- Resistencia a compresión= 250 kgf/cm<sup>2</sup>
- Relación agua/cemento obtenida en el gráfico, sin corregir:
  - Agregado Tipo I: 0,55
  - Agregado Tipo II: 0,57
  - Agregado Convencional: 0,61
- Relación  $\beta$  (agregado convencional)= 0,45



Tabla 4.32: Costo unitario de los componentes de una mezcla de concreto

| Componente              | Unidad         | Costo unitario (BsF) |                             |
|-------------------------|----------------|----------------------|-----------------------------|
| Cemento                 | saco           | 20                   |                             |
| Agua                    | m <sup>3</sup> | 0,6                  |                             |
| Agregados               | m <sup>3</sup> | Cantera              | Obra (cantera + transporte) |
| Arena natural           | m <sup>3</sup> | 45                   | 180                         |
| Piedra picada           | m <sup>3</sup> | 38                   | 180                         |
| Agregados Tipo I (A+G)  | m <sup>3</sup> | 50                   | 70                          |
| Agregados Tipo II (A+G) | m <sup>3</sup> | 50                   | 70                          |

Las mezclas fueron diseñadas aplicando el método descrito en el Manual del Concreto Estructural (Porrero, 2004), y resultaron con la siguiente dosificación:

Tablas 4.33: Dosificación y costo de las mezclas diseñadas

| Agregado Tipo I |                                  |  |                                   |
|-----------------|----------------------------------|--|-----------------------------------|
| Componente      | Peso (kgf/m <sup>3</sup> mezcla) | Volumen Absoluto (l/m <sup>3</sup> mezcla) | Costo (BsF/m <sup>3</sup> mezcla) |
| Cemento         | 384                              | 115  | 180,645                           |
| Agua            | 241                              | 241  | 0,144                             |
| Agregados (A+G) | 1459                             | 629  | 44,033                            |
| <b>TOTAL</b>    | 2084                             | 985  | 224,822                           |

| Agregado Tipo II |                                  |  |                                   |
|------------------|----------------------------------|--|-----------------------------------|
| Componente       | Peso (kgf/m <sup>3</sup> mezcla) | Volumen Absoluto (l/m <sup>3</sup> mezcla) | Costo (BsF/m <sup>3</sup> mezcla) |
| Cemento          | 366                              | 110  | 172,449                           |
| Agua             | 238                              | 238  | 0,143                             |
| Agregados (A+G)  | 1536                             | 638  | 44,626                            |
| <b>TOTAL</b>     | <b>2141</b>                      | <b>986</b>                                 | <b>217,217</b>                    |

| Agregado Convencional |                                  |  |                                   |
|-----------------------|----------------------------------|--|-----------------------------------|
| Componente            | Peso (kgf/m <sup>3</sup> mezcla) | Volumen Absoluto (l/m <sup>3</sup> mezcla) | Costo (BsF/m <sup>3</sup> mezcla) |
| Cemento               | 336                              | 101  | 157,895                           |
| Agua                  | 233                              | 233  | 0,140                             |
| Arena natural         | 778                              | 294  | 52,877                            |
| Piedra picada         | 951                              | 359  | 64,628                            |
| <b>TOTAL</b>          | <b>2299</b>                      | <b>987</b>                                 | <b>275,540</b>                    |

La mezcla diseñada con agregados convencionales presenta una dosificación de cemento menor a la de las mezclas diseñadas con agregados reciclados. A su vez, la dosificación de agua es similar.

Los agregados convencionales se presentaron por separado en arena y piedra picada, por el contrario, los agregados reciclados se trabajaron combinados ya que así fueron utilizados en la elaboración de las mezclas en este Trabajo de Investigación. En cuanto a la dosificación de los agregados, los convencionales se presentan en una cantidad mayor respecto a los reciclados, es por esto y por la composición de los materiales de origen que el concreto elaborado con agregados residuales es más liviano que el convencional.

El costo unitario de cada componente de las mezclas se estableció de la siguiente manera: (Ver Tabla 4.32)

- Cemento: se utilizó el costo establecido por el Colegio de Ingenieros, ya que es aproximadamente el mismo que se encuentra en el mercado.
- Agua: se utilizó el costo aproximado establecido por La Compañía Hidrocapital.
- Agregados:

- Agregados convencionales:

- El costo en cantera de los agregados convencionales corresponde al establecido por el Colegio de Ingenieros.

- Agregados residuales:

- El costo en cantera de los agregados residuales corresponde al aplicado por la empresa Yanes Ingenieros Constructores, siendo la única empresa de la cual se consiguió información sobre la aplicación de técnicas de reciclaje de residuos de materiales de construcción.

El costo de los agregados que se utilizó en el cálculo, es un aproximado al que se tiene en el mercado en Caracas, es decir, se utilizó el costo en obra el cual incluye el costo de cantera más el de transporte.

Para los agregados convencionales se consideró que el costo en obra generalmente se trabaja estableciendo un mismo valor para la arena y la piedra. A su vez, los agregados reciclados presentan un costo muy bajo en relación a los convencionales, ya que se basa en la instalación de plantas de reciclaje móviles, que se ubican en sectores donde existan varios ó importantes generadores y consumidores de este material, reduciendo así el costo elevado del transporte.

#### **4.3.4.5. Contraste del costo de elaboración de mezclas con los diferentes tipos de agregados**

Las mezclas elaboradas con agregados convencionales si bien están compuestas por una cantidad menor de cemento, en cuanto al contenido de agregados supera a las mezclas elaboradas con agregados residuales. Esto implica, que el costo de producción de mezclas convencionales sea mayor ya que el costo del mercado de estos materiales es muy elevado en relación al que tienen los agregados reciclados.

Los agregados provenientes de residuos pétreos de materiales de construcción presentan una ventaja en el costo, debido a que este se establece con la idea de que los agregados sean adquiridos en plantas móviles de reciclaje instaladas en obras donde se encuentren en ejecución un conjunto de actividades de construcción ó demolición, con lo cual se consigue una reducción en el costo relacionado al transporte del material.

A su vez, con la instalación de plantas móviles de reciclaje de residuos pétreos de materiales de construcción, ubicadas en zonas céntricas, se consigue reducir a la mitad el costo de transporte relacionado con el bote de estos y la compra de los agregados, ya que el vehículo que realiza el transporte de los materiales residuales al vertedero podría dejarlos en la planta de reciclaje cercana a la zona, y regresar a la obra con agregados reciclados, en el caso de obras en construcción. En el caso de obras en demolición se reduce el costo por transporte ya que el lugar de vertido de los residuos se encontraría cercano a la obra.

#### 4.3.5. Resistencia a la Tracción indirecta



Foto N°19: Ilustración de la colocación de las probetas cilíndricas para realizar el ensayo de resistencia a la tracción indirecta

#### 4.3.5.1. Características de las probetas ensayadas

Tabla 4.34: Características de las probetas de concreto ensayadas a tracción

| Tipo de agregado | Resistencia de diseño a los 28 días (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Edad de ensayo (días) | Características de las probetas |               |                        |             |                      |            |
|------------------|--|-----------------------|---------------------------------|---------------|------------------------|-------------|----------------------|------------|
|                  |  |                       | Nº Probeta                      | Diámetro (cm) | Diámetro promedio (cm) | Altura (cm) | Altura promedio (cm) | Peso (kgf) |
| Tipo I           | 210  | 7                     | 1                               | 15,04         | 15,00                  | 30,08       | 30,10                | 10,970     |
|                  |  |                       |                                 | 15,00         |                        | 30,11       |                      |            |
|                  |  |                       |                                 | 14,97         |                        | 30,11       |                      |            |
|                  |  |                       | 2                               | 14,96         | 14,98                  | 30,11       | 30,10                | 10,940     |
|                  |  |                       |                                 | 14,98         |                        | 30,10       |                      |            |
|                  |  |                       |                                 | 15,00         |                        | 30,10       |                      |            |
|                  |  | 28                    | 1                               | 14,82         | 14,97                  | 30,10       | 30,14                | 11,197     |
|                  |  |                       |                                 | 15,13         |                        | 30,20       |                      |            |
|                  |  |                       |                                 | 14,95         |                        | 30,11       |                      |            |
|                  |  |                       | 2                               | 14,91         | 14,95                  | 30,13       | 30,09                | 11,102     |
|                  |  |                       |                                 | 14,94         |                        | 30,10       |                      |            |
|                  |  |                       |                                 | 15,00         |                        | 30,03       |                      |            |
|                  |  |                       | 3                               | 14,93         | 14,93                  | 30,30       | 30,30                | 11,325     |
|                  |  |                       |                                 | 14,93         |                        | 30,34       |                      |            |
|                  |  |                       |                                 | 14,94         |                        | 30,26       |                      |            |

| Tipo de agregado | Resistencia de diseño a los 28 días (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Edad de ensayo (días) | Características de las probetas |               |                        |             |                      |            |
|------------------|--|-----------------------|---------------------------------|---------------|------------------------|-------------|----------------------|------------|
|                  |  |                       | Nº Probeta                      | Diámetro (cm) | Diámetro promedio (cm) | Altura (cm) | Altura promedio (cm) | Peso (kgf) |
| Tipo I           | 250  | 7                     | 1                               | 14,90         | 15,04                  | 30,20       | 30,21                | 11,260     |
|                  |  |                       |                                 | 15,10         |                        | 30,20       |                      |            |
|                  |  |                       |                                 | 15,13         |                        | 30,23       |                      |            |
|                  |  |                       | 2                               | 14,95         | 15,00                  | 30,16       | 30,08                | 11,163     |
|                  |  |                       |                                 | 15,10         |                        | 30,05       |                      |            |
|                  |  |                       |                                 | 14,96         |                        | 30,04       |                      |            |
|                  |  |                       | 3                               | 14,92         | 14,93                  | 30,20       | 30,21                | 11,288     |
|                  |  |                       |                                 | 14,96         |                        | 30,20       |                      |            |
|                  |  |                       |                                 | 14,91         |                        | 30,22       |                      |            |
|                  |  | 28                    | 1                               | 14,96         | 14,97                  | 30,05       | 30,02                | 10,959     |
|                  |  |                       |                                 | 14,96         |                        | 30,00       |                      |            |
|                  |  |                       |                                 | 15,00         |                        | 30,00       |                      |            |
|                  |  |                       | 2                               | 14,90         | 14,95                  | 30,30       | 30,30                | 11,273     |
|                  |  |                       |                                 | 15,00         |                        | 30,30       |                      |            |
|                  |  |                       |                                 | 14,94         |                        | 30,30       |                      |            |
|                  |  |                       | 3                               | 15,00         | 15,00                  | 30,00       | 30,00                | 11,026     |
|                  |  |                       |                                 | 15,00         |                        | 30,00       |                      |            |
|                  |  |                       |                                 | 14,99         |                        | 29,99       |                      |            |



| Tipo de agregado | Resistencia de diseño a los 28 días (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Edad de ensayo (días) | Características de las probetas |               |                        |             |                      |            |
|------------------|--|-----------------------|---------------------------------|---------------|------------------------|-------------|----------------------|------------|
|                  |  |                       | Nº Probeta                      | Diámetro (cm) | Diámetro promedio (cm) | Altura (cm) | Altura promedio (cm) | Peso (kgf) |
| Tipo I           | 280  | 7                     | 1                               | 15,00         | 14,98                  | 30,35       | 30,35                | 11,298     |
|                  |  |                       |                                 | 14,87         |                        | 30,30       |                      |            |
|                  |  |                       |                                 | 15,07         |                        | 30,40       |                      |            |
|                  |  |                       | 2                               | 14,95         | 14,95                  | 30,10       | 30,05                |            |
|                  |  |                       |                                 | 14,95         |                        | 30,05       |                      |            |
|                  |  |                       |                                 | 14,95         |                        | 30,00       |                      |            |
|                  |  |                       | 3                               | 14,95         | 15,04                  | 30,12       | 30,07                |            |
|                  |  |                       |                                 | 15,06         |                        | 30,05       |                      |            |
|                  |  |                       |                                 | 15,12         |                        | 30,05       |                      |            |
|                  |  | 28                    | 1                               | 14,92         | 14,93                  | 30,08       | 30,09                |            |
|                  |  |                       |                                 | 14,95         |                        | 30,10       |                      |            |
|                  |  |                       |                                 | 14,93         |                        | 30,08       |                      |            |
|                  |  |                       | 2                               | 14,93         | 14,94                  | 30,10       | 30,11                |            |
|                  |  |                       |                                 | 14,96         |                        | 30,14       |                      |            |
|                  |  |                       |                                 | 14,93         |                        | 30,08       |                      |            |
|                  |  |                       | 3                               | 14,93         | 14,96                  | 30,20       | 30,19                |            |
|                  |  |                       |                                 | 14,94         |                        | 30,18       |                      |            |
|                  |  |                       |                                 | 15,00         |                        | 30,20       |                      |            |

| Tipo de agregado | Resistencia de diseño a los 28 días (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Edad de ensayo (días) | Características de las probetas |               |                        |             |                      |            |
|------------------|--|-----------------------|---------------------------------|---------------|------------------------|-------------|----------------------|------------|
|                  |  |                       | Nº Probeta                      | Diámetro (cm) | Diámetro promedio (cm) | Altura (cm) | Altura promedio (cm) | Peso (kgf) |
| Tipo II          | 210  | 7                     | 1                               | 14,89         | 14,88                  | 30,03       | 30,04                | 11,671     |
|                  |  |                       |                                 | 14,82         |                        | 30,00       |                      |            |
|                  |  |                       |                                 | 14,93         |                        | 30,10       |                      |            |
|                  |  |                       | 2                               | 14,91         | 14,93                  | 30,14       | 30,16                |            |
|                  |  |                       |                                 | 14,96         |                        | 30,16       |                      |            |
|                  |  |                       |                                 | 14,92         |                        | 30,18       |                      |            |
|                  |  | 28                    | 1                               | 15,00         | 15,04                  | 29,20       | 30,07                |            |
|                  |  |                       |                                 | 15,20         |                        | 30,50       |                      |            |
|                  |  |                       |                                 | 14,92         |                        | 30,50       |                      |            |
|                  |  |                       | 2                               | 14,95         | 14,97                  | 29,00       | 29,33                |            |
|                  |  |                       |                                 | 15,00         |                        | 29,00       |                      |            |
|                  |  |                       |                                 | 14,96         |                        | 30,00       |                      |            |
|                  |  |                       | 3                               | 15,05         | 14,99                  | 30,20       | 30,20                |            |
|                  |  |                       |                                 | 15,01         |                        | 30,20       |                      |            |
|                  |  |                       |                                 | 14,91         |                        | 30,20       |                      |            |

| Tipo de agregado | Resistencia de diseño a los 28 días (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Edad de ensayo (días) | Características de las probetas |               |                        |             |                      |            |
|------------------|--|-----------------------|---------------------------------|---------------|------------------------|-------------|----------------------|------------|
|                  |  |                       | Nº Probeta                      | Diámetro (cm) | Diámetro promedio (cm) | Altura (cm) | Altura promedio (cm) | Peso (kgf) |
| Tipo II          | 250  | 7                     | 1                               | 14,94         | 14,95                  | 30,37       | 30,34                | 11,685     |
|                  |  |                       |                                 | 14,96         |                        | 30,35       |                      |            |
|                  |  |                       |                                 | 14,96         |                        | 30,30       |                      |            |
|                  |  |                       | 2                               | 14,95         | 14,97                  | 30,02       | 30,06                | 11,490     |
|                  |  |                       |                                 | 14,93         |                        | 30,05       |                      |            |
|                  |  |                       |                                 | 15,02         |                        | 30,10       |                      |            |
|                  |  |                       | 3                               | 14,93         | 14,93                  | 30,14       | 30,13                | 11,757     |
|                  |  |                       |                                 | 14,91         |                        | 30,13       |                      |            |
|                  |  |                       |                                 | 14,96         |                        | 30,13       |                      |            |
|                  |  | 28                    | 1                               | 15,00         | 14,94                  | 30,20       | 30,17                | 11,698     |
|                  |  |                       |                                 | 14,83         |                        | 30,17       |                      |            |
|                  |  |                       |                                 | 15,00         |                        | 30,15       |                      |            |
|                  |  |                       | 2                               | 15,00         | 14,99                  | 30,00       | 30,03                | 11,768     |
|                  |  |                       |                                 | 14,99         |                        | 30,08       |                      |            |
|                  |  |                       |                                 | 14,98         |                        | 30,00       |                      |            |
|                  |  |                       | 3                               | 14,95         | 14,98                  | 30,10       | 30,10                | 11,609     |
|                  |  |                       |                                 | 15,00         |                        | 30,10       |                      |            |
|                  |  |                       |                                 | 14,98         |                        | 30,10       |                      |            |

| Tipo de agregado | Resistencia de diseño a los 28 días (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Edad de ensayo (días) | Características de las probetas |               |                        |             |                      |            |
|------------------|--|-----------------------|---------------------------------|---------------|------------------------|-------------|----------------------|------------|
|                  |  |                       | Nº Probeta                      | Diámetro (cm) | Diámetro promedio (cm) | Altura (cm) | Altura promedio (cm) | Peso (kgf) |
| Tipo II          | 280  | 7                     | 1                               | 14,88         | 14,94                  | 30,26       | 30,26                | 11,511     |
|                  |  |                       |                                 | 15,00         |                        | 30,26       |                      |            |
|                  |  |                       |                                 | 14,93         |                        | 30,25       |                      |            |
|                  |  |                       | 2                               | 14,90         | 14,92                  | 30,10       | 30,05                | 11,398     |
|                  |  |                       |                                 | 14,92         |                        | 30,05       |                      |            |
|                  |  |                       |                                 | 14,95         |                        | 30,00       |                      |            |
|                  |  |                       | 3                               | 14,90         | 14,96                  | 30,00       | 29,83                | 11,326     |
|                  |  |                       |                                 | 15,00         |                        | 29,50       |                      |            |
|                  |  |                       |                                 | 14,98         |                        | 30,00       |                      |            |
|                  |  | 28                    | 1                               | 14,90         | 14,94                  | 30,05       | 30,05                | 11,578     |
|                  |  |                       |                                 | 14,94         |                        | 30,05       |                      |            |
|                  |  |                       |                                 | 14,98         |                        | 30,04       |                      |            |
|                  |  |                       | 2                               | 15,00         | 14,98                  | 30,14       | 30,19                | 11,305     |
|                  |  |                       |                                 | 15,00         |                        | 30,20       |                      |            |
|                  |  |                       |                                 | 14,95         |                        | 30,23       |                      |            |
|                  |  |                       | 3                               | 14,90         | 14,94                  | 30,34       | 30,34                | 11,619     |
|                  |  |                       |                                 | 14,98         |                        | 30,33       |                      |            |
|                  |  |                       |                                 | 14,93         |                        | 30,34       |                      |            |

#### 4.3.5.2. Resultados y análisis del ensayo de resistencia a la tracción indirecta

Los cilindros ensayados a tracción, presentaron los mismos aspectos de la superficie de falla que se observaron en los cilindros ensayados a compresión, en los cuales fallaban los agregados gruesos y la interfase mortero/agregado. La forma de rotura del cilindro fue una grieta paralela a la generatriz del cilindro, en toda su longitud, por lo que el cilindro se quebró en toda la mitad.

Tabla 4.35: Resultados Obtenidos de Ensayos de Tracción Indirecta a cilindros con agregados Tipo I.

| Tipo de agregado | Resistencia de diseño a los 28 días (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Edad de ensayo (días) | Características de las probetas |               |             |                             |  |   |
|------------------|--|-----------------------|---------------------------------|---------------|-------------|-----------------------------|--|---|
|                  |  |                       | Nº Probeta                      | Diámetro (cm) | Altura (cm) | Carga máxima aplicada (kgf) | Resistencia Calculada (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Resistencia promedio calculada (kgf/cm <sup>2</sup> ) |
| Tipo I           | 210  | 7                     | 1                               | 15,00         | 30,10       | 15200                       | 21,43  | 17  |
|                  |  |                       | 2                               | 14,98         | 30,10       | 8400                        | 11,86  |   |
|                  |  | 28                    | 1                               | 14,97         | 30,14       | 17200                       | 24,27  | 21  |
|                  |  |                       | 2                               | 14,95         | 30,09       | 14400                       | 20,38  |   |
|                  |  |                       | 3                               | 14,93         | 30,30       | 13600                       | 19,14  |   |

| Tipo de agregado | Resistencia de diseño a los 28 días (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Edad de ensayo (días) | Características de las probetas |               |             |                             |  |   |
|------------------|--|-----------------------|---------------------------------|---------------|-------------|-----------------------------|--|---|
|                  |  |                       | Nº Probeta                      | Diámetro (cm) | Altura (cm) | Carga máxima aplicada (kgf) | Resistencia Calculada (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Resistencia promedio calculada (kgf/cm <sup>2</sup> ) |
| Tipo I           | 250  | 7                     | 1                               | 15,04         | 30,21       | 11000                       | 15,41  | 20  |
|                  |  |                       | 2                               | 15,00         | 30,08       | 16200                       | 22,86  |   |
|                  |  |                       | 3                               | 14,93         | 30,21       | 16400                       | 23,15  |   |
|                  |  | 28                    | 1                               | 14,97         | 30,02       | 20600                       | 29,18  | 27  |
|                  |  |                       | 2                               | 14,95         | 30,30       | 18200                       | 25,58  |   |
|                  |  |                       | 3                               | 15,00         | 30,00       | 18800                       | 26,60  |   |

| Tipo de agregado | Resistencia de diseño a los 28 días (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Edad de ensayo (días) | Características de las probetas |               |             |                             |  |   |
|------------------|--|-----------------------|---------------------------------|---------------|-------------|-----------------------------|--|---|
|                  |  |                       | Nº Probeta                      | Diámetro (cm) | Altura (cm) | Carga máxima aplicada (kgf) | Resistencia Calculada (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Resistencia promedio calculada (kgf/cm <sup>2</sup> ) |
| Tipo I           | 280  | 7                     | 1                               | 14,98         | 30,35       | 10800                       | 15,12  | 18  |
|                  |  |                       | 2                               | 14,95         | 30,05       | 13200                       | 18,71  |   |
|                  |  |                       | 3                               | 15,04         | 30,07       | 14000                       | 19,71  |   |
|                  |  | 28                    | 1                               | 14,93         | 30,09       | 19800                       | 28,06  | 25  |
|                  |  |                       | 2                               | 14,94         | 30,11       | 16200                       | 22,93  |   |
|                  |  |                       | 3                               | 14,96         | 30,19       | 17000                       | 23,96  |   |

Tabla 4.36: Resultados Obtenidos de Ensayos de Tracción Indirecta a cilindros con agregados Tipo II.

| Tipo de agregado | Resistencia de diseño a los 28 días (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Edad de ensayo (días) | Características de las probetas |               |             |                             |  | Resistencia promedio calculada (kgf/cm <sup>2</sup> ) |
|------------------|--|-----------------------|---------------------------------|---------------|-------------|-----------------------------|--|---|
|                  |  |                       | Nº Probeta                      | Diámetro (cm) | Altura (cm) | Carga máxima aplicada (kgf) | Resistencia Calculada (kgf/cm <sup>2</sup> ) |   |
| Tipo II          | 210  | 7                     | 1                               | 14,88         | 30,04       | 18000                       | 25,64  | 26  |
|                  |  |                       | 2                               | 14,93         | 30,16       | 18600                       | 26,30  |   |
|                  |  | 28                    | 1                               | 15,04         | 30,07       | 19600                       | 27,59  | 27  |
|                  |  |                       | 2                               | 14,97         | 29,33       | 17800                       | 25,81  |   |
|                  |  |                       | 3                               | 14,99         | 30,20       | 18800                       | 26,44  |   |



| Tipo de agregado | Resistencia de diseño a los 28 días (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Edad de ensayo (días) | Características de las probetas |               |             |                             |  |   |
|------------------|--|-----------------------|---------------------------------|---------------|-------------|-----------------------------|--|---|
|                  |  |                       | Nº Probeta                      | Diámetro (cm) | Altura (cm) | Carga máxima aplicada (kgf) | Resistencia Calculada (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Resistencia promedio calculada (kgf/cm <sup>2</sup> ) |
| Tipo II          | 250  | 7                     | 1                               | 14,95         | 30,34       | 14200                       | 19,93  | 16  |
|                  |  |                       | 2                               | 14,97         | 30,06       | 10800                       | 15,28  |   |
|                  |  |                       | 3                               | 14,93         | 30,13       | 10000                       | 14,15  |   |
|                  |  | 28                    | 1                               | 14,94         | 30,17       | 15000                       | 21,19  | 22  |
|                  |  |                       | 2                               | 14,99         | 30,03       | 13600                       | 19,23  |   |
|                  |  |                       | 3                               | 14,98         | 30,10       | 17600                       | 24,85  |   |

| Tipo de agregado | Resistencia de diseño a los 28 días (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Edad de ensayo (días) | Características de las probetas |               |             |                             |  |   |
|------------------|--|-----------------------|---------------------------------|---------------|-------------|-----------------------------|--|---|
|                  |  |                       | Nº Probeta                      | Diámetro (cm) | Altura (cm) | Carga máxima aplicada (kgf) | Resistencia Calculada (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Resistencia promedio calculada (kgf/cm <sup>2</sup> ) |
| Tipo II          | 280  | 7                     | 1                               | 14,94         | 30,26       | 11200                       | 15,77  | 19  |
|                  |  |                       | 2                               | 14,92         | 30,05       | 14600                       | 20,73  |   |
|                  |  |                       | 3                               | 14,96         | 29,83       | 14400                       | 20,54  |   |
|                  |  | 28                    | 1                               | 14,94         | 30,05       | 21600                       | 30,63  | 25  |
|                  |  |                       | 2                               | 14,98         | 30,19       | 12000                       | 16,89  |   |
|                  |  |                       | 3                               | 14,94         | 30,34       | 18500                       | 25,98  |   |



Foto N°20: Ilustración de una probeta ensayada a tracción indirecta, de la mezcla de resistencia de diseño de  $250 \text{ kgf/cm}^2$ , a la edad de ensayo de 7 días, con agregado Tipo I



Foto N°21: Ilustración de una probeta ensayada a tracción indirecta, de la mezcla de resistencia de diseño de  $280 \text{ kgf/cm}^2$ , a la edad de ensayo de 7 días, con agregado Tipo II

Tabla 4.37: Valores de resistencia a la tracción (estimados y obtenidos)

| <b>Agregados Tipo I</b>          |  |   |
|----------------------------------|--|---|
| <b>Edad de ensayo (días)</b>     | <b>Resistencia a la tracción indirecta estimada (kgf/cm<sup>2</sup>)</b> | <b>Resistencia a la tracción indirecta obtenida de ensayos (kgf/cm<sup>2</sup>)</b> |
| 7 (Aprox. 60 % R <sub>28</sub> ) | 12   | 17  |
|                                  | 14   | 20  |
|                                  | 15   | 18  |
| 28                               | 19   | 21  |
|                                  | 22   | 27  |
|                                  | 24   | 25  |

| <b>Agregados Tipo II</b>         |  |   |
|----------------------------------|--|---|
| <b>Edad de ensayo (días)</b>     | <b>Resistencia a la tracción indirecta Estimada (kgf/cm<sup>2</sup>)</b> | <b>Resistencia a la tracción indirecta obtenida de ensayos (kgf/cm<sup>2</sup>)</b> |
| 7 (Aprox. 60 % R <sub>28</sub> ) | 12   | 26  |
|                                  | 14   | 16  |
|                                  | 15   | 19  |
| 28                               | 19   | 27  |
|                                  | 22   | 22  |
|                                  | 24   | 25  |

Fórmula N°4: Esfuerzo de tracción indirecta

$$\sigma = \frac{2 \times P}{\pi \times L \times d}$$

Donde: P: carga aplicada (kgf)

L: longitud del cilindro (cm)

d: diámetro del cilindro (cm)

Como se puede observar en los resultados de la Tabla 4.37, los valores de resistencia a la tracción están en los límites, es decir, son mayores o iguales a los valores de resistencia esperados. Sin embargo, algunos valores de resistencia que están en el límite, quizás se deban al mal posicionamiento de la probeta, ya que la

carga aplicada debe estar exactamente a lo largo de la generatriz el cilindro, de lo contrario, el cilindro fallará antes del momento previsto. Como se puede observar, todos los valores de resistencia a la tracción a los 28 días cumplen con los valores esperados o estimados de resistencia, por lo tanto, se puede decir que los dos tipos de concreto estudiados tienen comportamiento aceptable de resistencia a la tracción indirecta. Los tipos de fallas (falla del agregado, falla de la interfase mortero-agregado y falla del mortero) presentados en los cilindros ensayados a tracción indirecta, fueron los mismos que presentaron los cilindros ensayados a compresión simple.

#### 4.3.6. Velocidad de propagación de ondas

Tabla 4.38: Resultados de los ensayos de Velocidad de Propagación de ondas realizados a cilindros con agregados Tipo I

| Resistencia de diseño a los 28 días (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Edad de ensayo (días) | Nº Probeta | Tipo de ensayo aplicado | Altura (cm) | Tiempo de propagación de onda (µs) | Promedio del Tiempo de propagación de onda (µs) | Velocidad de propagación de onda (m/s) |
|--|-----------------------|------------|-------------------------|-------------|------------------------------------|---|--|
| 210  | 7                     | 1          | Compresión              | 30,08       | 84,6                               | 86,1  | 3497                                   |
|  |                       | 2          |                         | 30,09       | 87,5                               |   |  |
|  | 28                    | 1          |                         | 30,20       | 87,1                               | 87,3  | 3451                                   |
|  |                       | 2          |                         | 30,13       | 86,6                               |   |  |
|  |                       | 3          |                         | 30,05       | 88,1                               |   |  |
|  | 250                   | 7          |                         | 1           | 30,18                              | 92,6  | 94,6                                   |
| 2  |                       |            |                         | 30,12       | 94,7                               |   |  |
| 3  |                       |            |                         | 30,31       | 96,6                               |   |  |
| 28   |                       | 1          |                         | 29,38       | 86,1                               | 87,3  | 3406                                   |
|  |                       | 2          |                         | 29,68       | 88,7                               |   |  |
|  |                       | 3          |                         | 30,12       | 87,1                               |   |  |
| 280  | 7                     | 1          |                         | 30,05       | 84,3                               | 86,6  | 3458                                   |
|  |                       | 2          | 29,70                   | 87,7        |                                    |   |  |
|  |                       | 3          | 30,09                   | 87,9        |                                    |   |  |
|  | 28                    | 1          | 30,18                   | 82,8        | 84,7                               | 3550  |  |
|  |                       | 2          | 30,05                   | 85,1        |                                    |   |  |
|  |                       | 3          | 29,97                   | 86,1        |                                    |   |  |

| Resistencia de diseño a los 28 días (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Edad de ensayo (días) | Nº Probeta | Tipo de ensayo aplicado | Altura (cm) | Tiempo de propagación de onda (µs) | Promedio del Tiempo de propagación de onda (µs) | Velocidad de propagación de onda (m/s) |
|--|-----------------------|------------|-------------------------|-------------|------------------------------------|---|--|
| 210  | 7                     | 1          | Tracción Indirecta      | 30,10       | 84,7                               | 85,2  | 3535                                   |
|  |                       | 2          |                         | 30,10       | 85,6                               |   |  |
|  | 28                    | 1          |                         | 30,14       | 84,5                               | 87,1  | 3465                                   |
|  |                       | 2          |                         | 30,09       | 88,1                               |   |  |
|  |                       | 3          |                         | 30,30       | 88,7                               |   |  |
|  | 250                   | 7          |                         | 1           | 30,21                              | 97,2  | 95,6                                   |
| 2  |                       |            |                         | 30,08       | 94,7                               |   |  |
| 3  |                       |            |                         | 30,21       | 94,9                               |   |  |
| 28   |                       | 1          |                         | 30,02       | 86,7                               | 86,7  | 3473                                   |
|  |                       | 2          |                         | 30,30       | 87,7                               |   |  |
|  |                       | 3          |                         | 30,00       | 85,7                               |   |  |
| 280  | 7                     | 1          |                         | 30,35       | 84,7                               | 85,2  | 3540                                   |
|  |                       | 2          | 30,05                   | 87,8        |                                    |   |  |
|  |                       | 3          | 30,07                   | 83,2        |                                    |   |  |
|  | 28                    | 1          | 30,09                   | 84,7        | 84,8                               | 3553  |  |
|  |                       | 2          | 30,11                   | 86,5        |                                    |   |  |
|  |                       | 3          | 30,19                   | 83,3        |                                    |   |  |

Tabla 4.39: Resultados de los ensayos de Velocidad de Propagación de ondas realizados a cilindros con agregados Tipo II

| Resistencia de diseño a los 28 días (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Edad de ensayo (días) | Nº Probeta | Tipo de ensayo aplicado | Altura (cm) | Tiempo de propagación de onda (µs) | Promedio del Tiempo de propagación de onda (µs) | Velocidad de propagación de onda (m/s) |
|--|-----------------------|------------|-------------------------|-------------|------------------------------------|---|--|
| 210  | 7                     | 1          | Compresión              | 30,09       | 81,0                               | 84,2  | 3582                                   |
|  |                       | 2          |                         | 30,11       | 87,3                               |   |  |
|  | 28                    | 1          |                         | 29,27       | 80,6                               | 81,0  | 3677                                   |
|  |                       | 2          |                         | 30,06       | 78,8                               |   |  |
|  |                       | 3          |                         | 30,01       | 83,6                               |   |  |
| 250  | 7                     | 1          |                         | 30,26       | 84,4                               | 82,6  | 3653                                   |
|  |                       | 2          |                         | 30,26       | 81,2                               |   |  |
|  |                       | 3          |                         | 30,01       | 82,3                               |   |  |
|  | 28                    | 1          |                         | 30,06       | 80,5                               | 80,3  | 3745                                   |
|  |                       | 2          |                         | 30,05       | 78,9                               |   |  |
|  |                       | 3          | 30,10                   | 81,5        |                                    |   |  |
| 280  | 7                     | 1          | 30,17                   | 82,8        | 82,3                               | 3654  |  |
|  |                       | 2          | 30,02                   | 82,2        |                                    |   |  |
|  |                       | 3          | 30,03                   | 81,9        |                                    |   |  |
|  | 28                    | 1          | 30,10                   | 80,7        | 81,4                               | 3699  |  |
|  |                       | 2          | 30,08                   | 79,4        |                                    |   |  |
|  |                       | 3          | 30,15                   | 84,2        |                                    |   |  |



| Resistencia de diseño a los 28 días (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Edad de ensayo (días) | Nº Probeta | Tipo de ensayo aplicado | Altura (cm) | Tiempo de propagación de onda (µs) | Promedio del Tiempo de propagación de onda (µs) | Velocidad de propagación de onda (m/s) |
|--|-----------------------|------------|-------------------------|-------------|------------------------------------|---|--|
| 210  | 7                     | 1          | Tracción Indirecta      | 30,04       | 85,5                               | 85,0  | 3543                                   |
|  |                       | 2          |                         | 30,16       | 84,4                               |   |  |
|  | 28                    | 1          |                         | 30,07       | 81,1                               | 81,1  | 3683                                   |
|  |                       | 2          |                         | 29,33       | 80,6                               |   |  |
|  |                       | 3          |                         | 30,20       | 81,6                               |   |  |
|  | 250                   | 7          |                         | 1           | 30,34                              | 85,0  | 83,0                                   |
| 2  |                       |            |                         | 30,06       | 83,4                               |   |  |
| 3  |                       |            |                         | 30,13       | 80,6                               |   |  |
| 28   |                       | 1          |                         | 30,17       | 79,5                               | 79,7  | 3777                                   |
|  |                       | 2          |                         | 30,03       | 79,2                               |   |  |
|  |                       | 3          |                         | 30,10       | 80,3                               |   |  |
| 280  | 7                     | 1          |                         | 30,26       | 82,2                               | 82,5  | 3644                                   |
|  |                       | 2          | 30,05                   | 83,1        |                                    |   |  |
|  |                       | 3          | 29,83                   | 82,1        |                                    |   |  |
|  | 28                    | 1          | 30,05                   | 80,1        | 82,2                               | 3673  |  |
|  |                       | 2          | 30,19                   | 83,5        |                                    |   |  |
|  |                       | 3          | 30,34                   | 83,1        |                                    |   |  |

La velocidad de pulso ultrasónico permite estimar la homogeneidad del concreto. Si el valor de velocidad es muy alto, la densidad y la resistencia también lo serán. Según el libro de Malhotra, V. M. "Non destructive methods for testing concrete", los valores usuales de velocidades de pulso ultrasónico pueden asociarse a la calidad del concreto, de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 4.40: Condiciones generales del concreto según velocidad de pulso ultrasónico

| Condiciones Generales del Concreto | Velocidad de Pulso Ultrasónico (m/s) |
|------------------------------------|--------------------------------------|
| Excelente                          | > 4575                               |
| Bueno                              | 3660 - 4575                          |
| Cuestionable                       | 3050 - 3660                          |
| Pobre                              | 2135 - 3050                          |
| Muy Pobre                          | < 2135                               |

Fuente: Malhotra, V.M.

Los valores obtenidos del ensayo de velocidad de pulso ultrasónico realizados a los cilindros con agregado Tipo I a la edad de 28 días, están comprendidos en un rango de 3406 - 3553 (m/s), es decir, que los concretos ensayados son de condiciones generales “cuestionables”, según la Tabla N° 4.41, sin embargo, son valores aceptables, porque presentan una homogeneidad y resistencia regular.

En cuanto a los valores obtenidos del ensayo de velocidad de pulso ultrasónico realizados a los cilindros con agregado Tipo II a la edad de 28 días, los mismos están en un rango de 3673 - 3777 (m/s), por lo tanto, los concretos ensayados son “buenos”, presentando homogeneidad y buena resistencia.

Comparando el concreto realizado con agregados Tipo I y el concreto realizado con agregados Tipo II, se puede decir que los realizados con agregados Tipo II presentan valores de velocidad mayores que los realizados con agregados Tipo I. Esto se debe a que los concretos realizados con agregados Tipo I, presentan más zonas débiles, ya que los materiales que lo componen son porosos y la onda se transmite de forma más rápida a través de elementos más densos.

#### 4.3.7. Módulo de elasticidad secante



Foto N°22: Ilustración de probeta para aplicar el ensayo de módulo de elasticidad

### 4.3.7.1. Características de las probetas ensayadas

Tabla 4.41: Características de las probetas ensayadas

| Tipo de agregado | Resistencia de diseño a los 28 días (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Edad de ensayo (días) | Características de las probetas |               |                        |             |                      |            |                    |  |   |
|------------------|--|-----------------------|---------------------------------|---------------|------------------------|-------------|----------------------|------------|--------------------|--|---|
|                  |  |                       | Nº Probeta                      | Diámetro (cm) | Diámetro promedio (cm) | Altura (cm) | Altura promedio (cm) | Peso (kgf) | Carga máxima (kgf) | Resistencia calculada (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Resistencia promedio calculada (kgf/cm <sup>2</sup> ) |
| Tipo I           | 210  | 28                    | 1                               | 14,97         | 14,94                  | 29,50       | 29,60                | 11,079     | 38250              | 218,19                                       | 215,77  |
|                  |  |                       |                                 | 14,90         |                        | 29,60       |                      |            |                    |  |   |
|                  |  |                       |                                 | 14,95         |                        | 29,70       |                      |            |                    |  |   |
|                  |  |                       | 2                               | 14,90         | 15,00                  | 30,13       | 30,11                | 11,174     | 37700              | 213,34                                       |   |
|                  |  |                       |                                 | 15,10         |                        | 30,10       |                      |            |                    |  |   |
|                  |  |                       |                                 | 15,00         |                        | 30,10       |                      |            |                    |  |   |
|                  | 250  | 28                    | 1                               | 14,94         | 14,95                  | 30,00       | 30,02                | 11,083     | 48600              | 276,99                                       | 272,88  |
|                  |  |                       |                                 | 14,96         |                        | 30,05       |                      |            |                    |  |   |
|                  |  |                       |                                 | 14,94         |                        | 30,00       |                      |            |                    |  |   |
|                  |  |                       | 2                               | 14,94         | 14,95                  | 30,10       | 30,15                | 11,174     | 47200              | 268,77                                       |   |
|                  |  |                       |                                 | 14,97         |                        | 30,16       |                      |            |                    |  |   |
|                  |  |                       |                                 | 14,95         |                        | 30,20       |                      |            |                    |  |   |
|                  | 280  | 28                    | 1                               | 14,96         | 14,96                  | 30,14       | 30,14                | 11,205     | 42800              | 243,60                                       | 248,50  |
|                  |  |                       |                                 | 14,97         |                        | 30,14       |                      |            |                    |  |   |
|                  |  |                       |                                 | 14,94         |                        | 30,13       |                      |            |                    |  |   |
|                  |  |                       | 2                               | 14,95         | 14,97                  | 30,24       | 30,22                | 11,213     | 44600              | 253,40                                       |   |
|                  |  |                       |                                 | 15,00         |                        | 30,22       |                      |            |                    |  |   |
|                  |  |                       |                                 | 14,96         |                        | 30,20       |                      |            |                    |  |   |

| Tipo de agregado | Resistencia de diseño a los 28 días (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Edad de ensayo (días) | Características de las probetas |               |                        |             |                      |            |                    |  |   |
|------------------|--|-----------------------|---------------------------------|---------------|------------------------|-------------|----------------------|------------|--------------------|--|---|
|                  |  |                       | Nº Probeta                      | Diámetro (cm) | Diámetro promedio (cm) | Altura (cm) | Altura promedio (cm) | Peso (kgf) | Carga máxima (kgf) | Resistencia calculada (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Resistencia promedio calculada (kgf/cm <sup>2</sup> ) |
| Tipo II          | 210  | 28                    | 1                               | 15,05         | 15,04                  | 30,00       | 30,00                | 11,869     | 50600              | 284,82                                       | 270,41  |
|                  |  |                       |                                 | 15,04         |                        | 30,00       |                      |            |                    |  |   |
|                  |  |                       |                                 | 15,03         |                        | 30,00       |                      |            |                    |  |   |
|                  |  |                       | 2                               | 14,93         | 14,96                  | 29,90       | 29,93                | 11,694     | 45000              | 256,01                                       |   |
|                  |  |                       |                                 | 15,00         |                        | 30,00       |                      |            |                    |  |   |
|                  |  |                       |                                 | 14,95         |                        | 29,90       |                      |            |                    |  |   |
|                  | 250  | 28                    | 1                               | 14,95         | 14,97                  | 30,13       | 30,12                | 11,718     | 45400              | 258,06                                       | 270,12  |
|                  |  |                       |                                 | 14,95         |                        | 30,10       |                      |            |                    |  |   |
|                  |  |                       |                                 | 15,00         |                        | 30,14       |                      |            |                    |  |   |
|                  |  |                       | 2                               | 14,90         | 14,93                  | 30,17       | 30,16                | 11,810     | 49400              | 282,17                                       |   |
|                  |  |                       |                                 | 14,94         |                        | 30,15       |                      |            |                    |  |   |
|                  |  |                       |                                 | 14,95         |                        | 30,16       |                      |            |                    |  |   |
|                  | 280  | 28                    | 1                               | 14,80         | 14,87                  | 30,15       | 30,05                | 11,544     | 42800              | 246,45                                       | 258,73  |
|                  |  |                       |                                 | 14,95         |                        | 30,00       |                      |            |                    |  |   |
|                  |  |                       |                                 | 14,86         |                        | 30,00       |                      |            |                    |  |   |
| 2                |  |                       | 14,80                           | 14,86         | 30,00                  | 30,05       | 11,452               | 47000      | 271,00             |  |   |
|                  |  |                       | 14,88                           |               | 30,00                  |             |                      |            |                    |  |   |
|                  |  |                       | 14,90                           |               | 30,14                  |             |                      |            |                    |  |   |

#### 4.3.7.2. Resultados y análisis del ensayo de módulo de elasticidad secante

Tabla 4.42: Carga máxima aplicada en los ensayos de módulo de elasticidad a cilindros con agregados Tipo I

| Tipo de agregado | Resistencia de diseño a los 28 días (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Edad de ensayo (días) | Nº Probeta | Carga máxima a compresión (kgf) | Carga máxima promedio (kgf) | 40% de la carga máxima promedio (kgf) |
|------------------|--|-----------------------|------------|---------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|
| Tipo I           | 210  | 28                    | 1          | 36600                           | 36667                       | 14667                                 |
|                  |  |                       | 2          | 35000                           |                             |                                       |
|                  |  |                       | 3          | 38400                           |                             |                                       |
|                  | 250  | 28                    | 1          | 46600                           | 45800                       | 18320                                 |
|                  |  |                       | 2          | 46200                           |                             |                                       |
|                  |  |                       | 3          | 44600                           |                             |                                       |
|                  | 280  | 28                    | 1          | 42800                           | 42067                       | 16827                                 |
|                  |  |                       | 2          | 41600                           |                             |                                       |
|                  |  |                       | 3          | 41800                           |                             |                                       |

Tabla 4.43: Resultados obtenidos de ensayos de módulo de elasticidad a cilindros con agregados Tipo I,  $f_c=210 \text{ kgf/cm}^2$

| Probeta Nº1                     |                      |
|---------------------------------|----------------------|
| Esfuerzo (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Deformación unitaria |
| 9                               | 0,0000225            |
| 17                              | 0,000055             |
| 26                              | 0,0001125            |
| 34                              | 0,00016              |
| 43                              | 0,0002075            |
| 51                              | 0,0002525            |
| 60                              | 0,000305             |
| 68                              | 0,000345             |
| 77                              | 0,0004               |
| 86                              | 0,00045              |

| Probeta Nº2                     |                      |
|---------------------------------|----------------------|
| Esfuerzo (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Deformación unitaria |
| 8                               | 0,0000425            |
| 17                              | 0,0000825            |
| 25                              | 0,00014              |
| 34                              | 0,0002               |
| 42                              | 0,00026              |
| 51                              | 0,000315             |
| 59                              | 0,000365             |
| 68                              | 0,000415             |
| 76                              | 0,0004625            |
| 85                              | 0,0005175            |



Gráfico N°9: Módulo de elasticidad de probeta N°1,  $f_c=210 \text{ kgf/cm}^2$

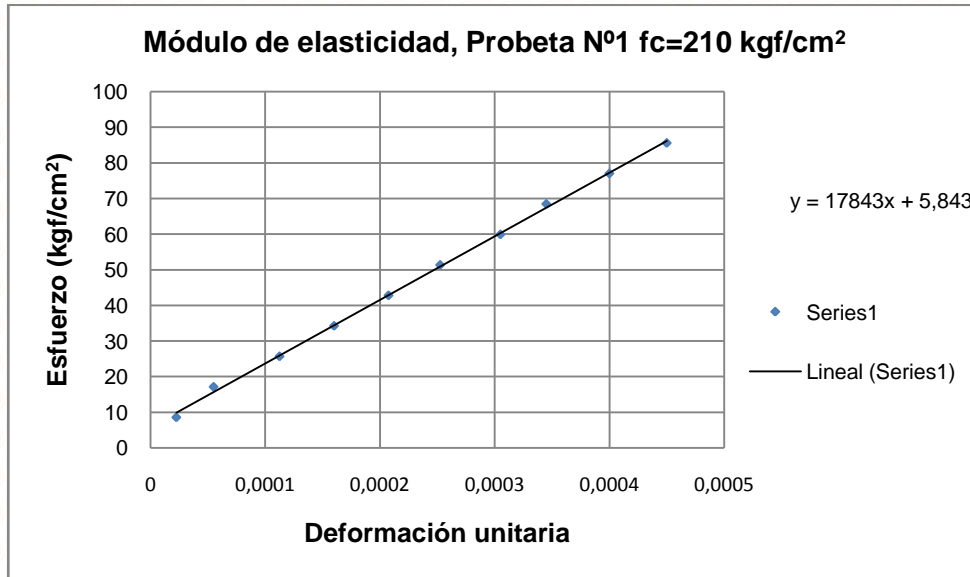


Gráfico N°10: Módulo de elasticidad de probeta N°2,  $f_c=210 \text{ kgf/cm}^2$

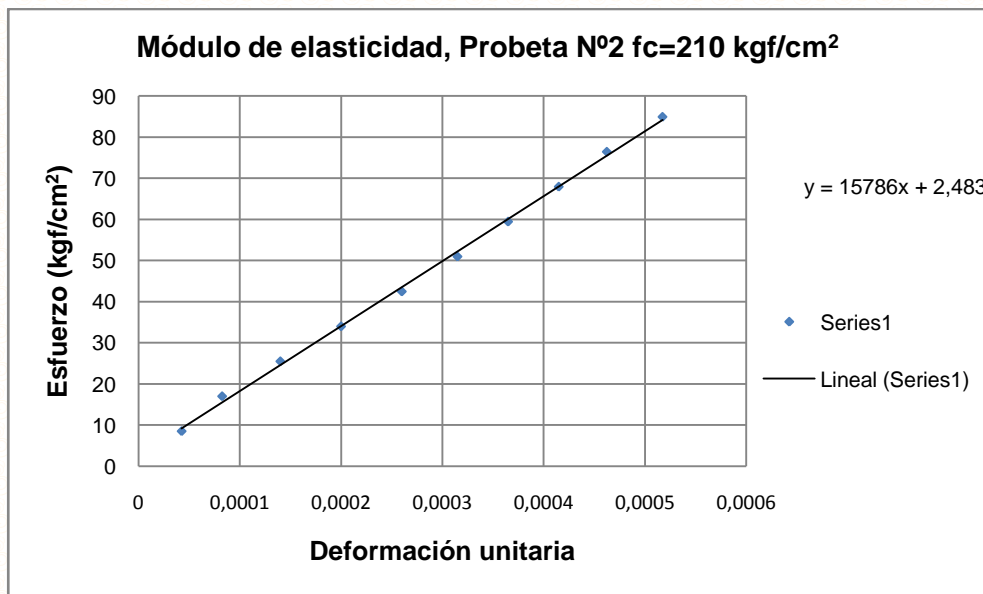


Tabla 4.44: Resultados obtenidos de ensayos de módulo de elasticidad a cilindros con agregados Tipo I,  $f_c=250 \text{ kgf/cm}^2$

| Probeta N°1                     |                      |
|---------------------------------|----------------------|
| Esfuerzo (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Deformación unitaria |
| 6                               | 0,0000075            |
| 11                              | 0,000025             |
| 17                              | 0,0000425            |
| 23                              | 0,00008              |
| 28                              | 0,0001125            |
| 34                              | 0,0001425            |
| 40                              | 0,0001625            |
| 46                              | 0,0001875            |
| 51                              | 0,000225             |
| 57                              | 0,0002475            |
| 63                              | 0,0002875            |
| 68                              | 0,0003025            |
| 74                              | 0,0003425            |
| 80                              | 0,00037              |
| 85                              | 0,0004025            |
| 91                              | 0,0004225            |
| 97                              | 0,00047              |
| 103                             | 0,0004975            |

| Probeta N°2                     |                      |
|---------------------------------|----------------------|
| Esfuerzo (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Deformación unitaria |
| 6                               | 0,0000225            |
| 11                              | 0,00005              |
| 17                              | 0,0000925            |
| 23                              | 0,0001225            |
| 28                              | 0,0001575            |
| 34                              | 0,0001875            |
| 40                              | 0,0002275            |
| 46                              | 0,0002625            |
| 51                              | 0,00029              |
| 57                              | 0,000325             |
| 63                              | 0,000355             |
| 68                              | 0,00039              |
| 74                              | 0,0004225            |
| 80                              | 0,0004575            |
| 85                              | 0,0004825            |
| 91                              | 0,0005175            |
| 97                              | 0,00056              |
| 102                             | 0,00058              |

Gráfico N°11: Módulo de elasticidad de probeta N°1,  $f_c=250 \text{ kgf/cm}^2$

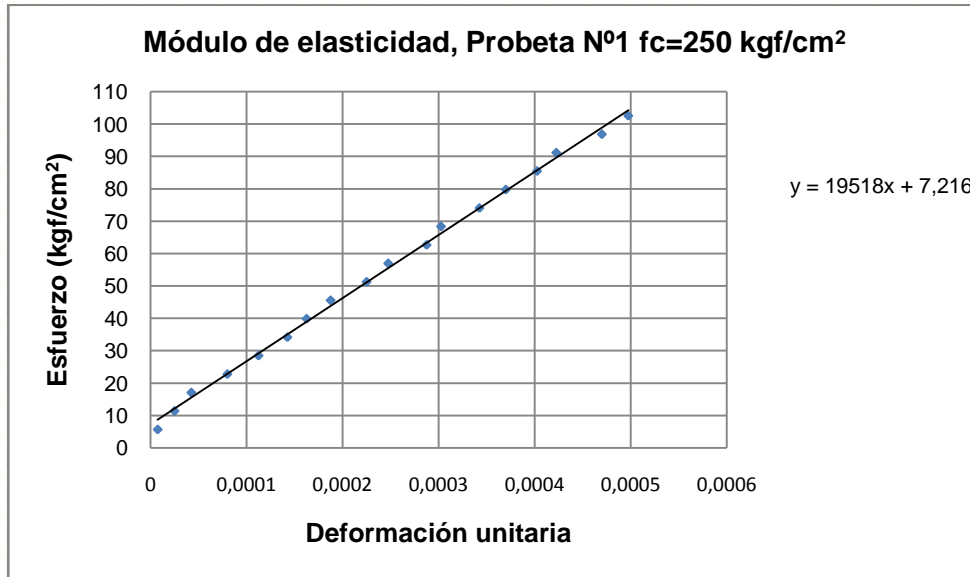


Gráfico N°12: Módulo de elasticidad de probeta N°2,  $f_c=250 \text{ kgf/cm}^2$

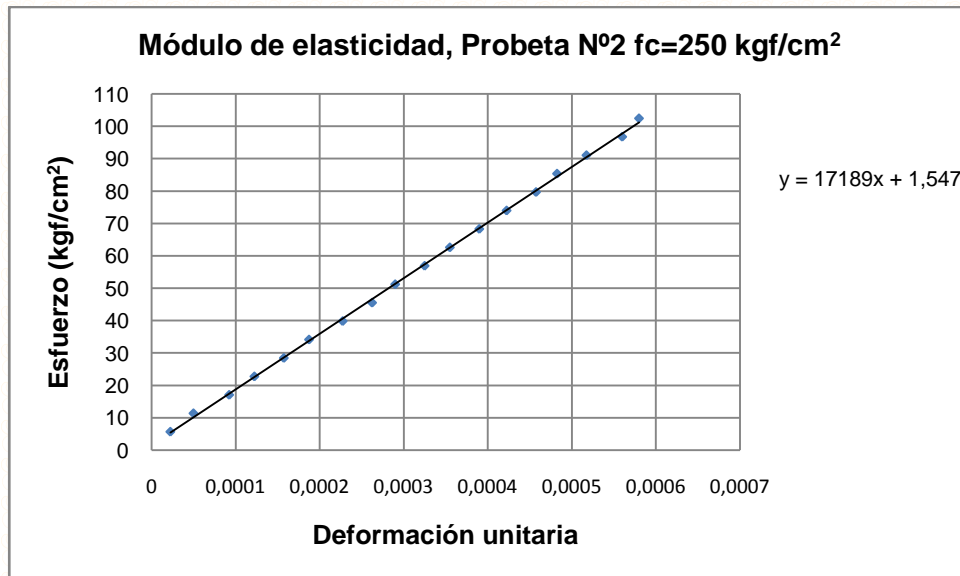


Tabla 4.45: Resultados obtenidos de ensayos de módulo de elasticidad a cilindros con agregados Tipo I,  $f_c=280 \text{ kgf/cm}^2$

| Probeta N°1                     |                      |
|---------------------------------|----------------------|
| Esfuerzo (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Deformación unitaria |
| 6                               | 0,0000025            |
| 11                              | 0,0000075            |
| 17                              | 0,000015             |
| 23                              | 0,0000325            |
| 28                              | 0,00005              |
| 34                              | 0,0000625            |
| 40                              | 0,00008              |
| 46                              | 0,0000925            |
| 51                              | 0,000115             |
| 57                              | 0,0001425            |
| 63                              | 0,000175             |
| 68                              | 0,0001975            |
| 74                              | 0,0002125            |
| 80                              | 0,000235             |
| 85                              | 0,00025              |
| 91                              | 0,0002775            |

| Probeta N°2                     |                      |
|---------------------------------|----------------------|
| Esfuerzo (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Deformación unitaria |
| 6                               | 0,00002              |
| 11                              | 0,0000425            |
| 17                              | 0,0000675            |
| 23                              | 0,0000975            |
| 28                              | 0,0001175            |
| 34                              | 0,0001375            |
| 40                              | 0,000185             |
| 45                              | 0,000205             |
| 51                              | 0,00024              |
| 57                              | 0,000275             |
| 62                              | 0,0003125            |
| 68                              | 0,0003425            |
| 74                              | 0,0003725            |
| 80                              | 0,00041              |
| 85                              | 0,00044              |
| 91                              | 0,00048              |

Gráfico N°13: Módulo de elasticidad de probeta N°1,  $f_c=280 \text{ kgf/cm}^2$

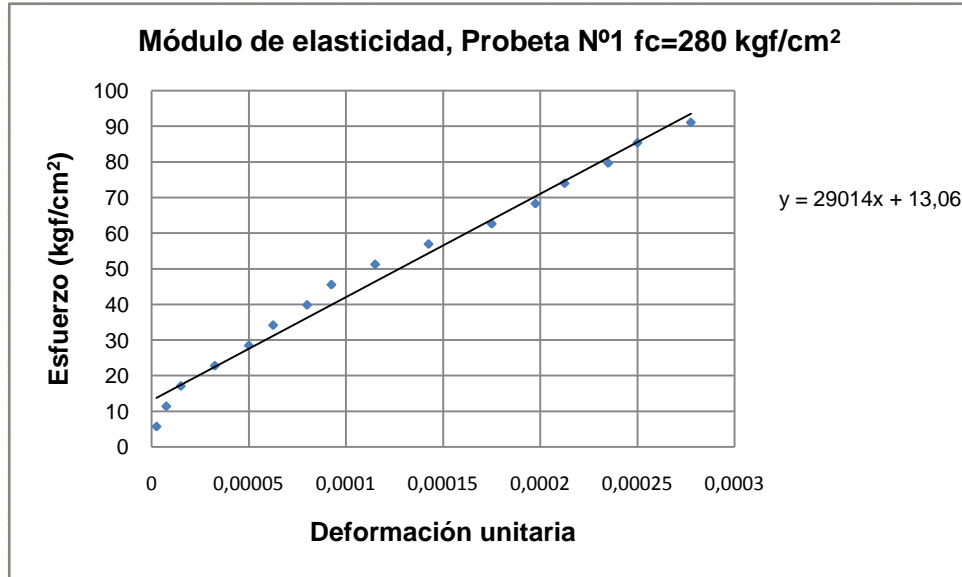


Gráfico N°14: Módulo de elasticidad de probeta N°2,  $f_c=280 \text{ kgf/cm}^2$

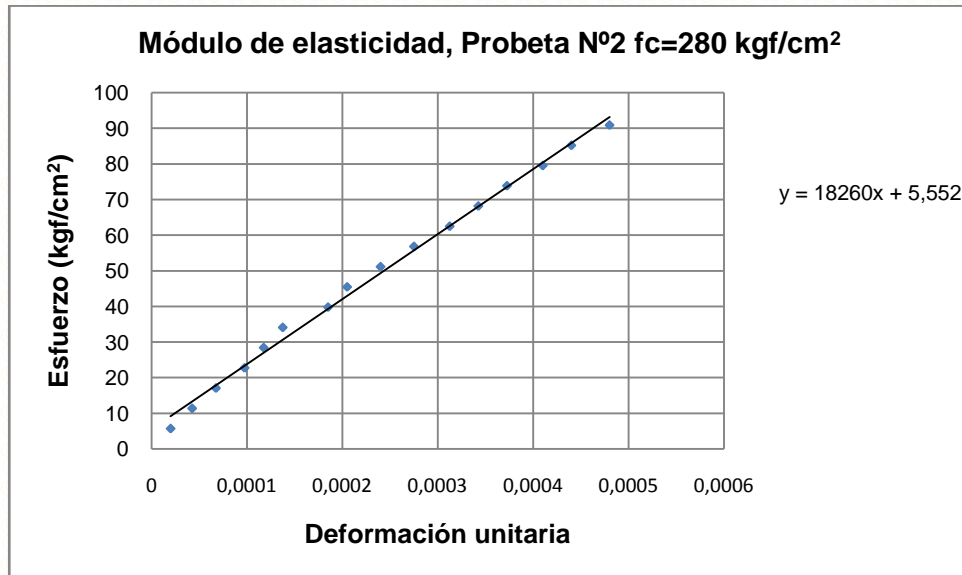


Tabla 4.46: Carga máxima aplicada en los ensayos de módulo de elasticidad a cilindros con agregados Tipo II

| Tipo de agregado | Resistencia de diseño a los 28 días (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Edad de ensayo (días) | Nº Probeta | Carga máxima a compresión (kgf) | Carga máxima promedio (kgf) | 40% de la carga máxima promedio (kgf) |
|------------------|--|-----------------------|------------|---------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|
| Tipo II          | 210  | 28                    | 1          | 50600                           | 42800                       | 17120                                 |
|                  |  |                       | 2          | 48600                           |                             |                                       |
|                  |  |                       | 3          | 29200                           |                             |                                       |
|                  | 250  | 28                    | 1          | 43400                           | 44267                       | 17707                                 |
|                  |  |                       | 2          | 45800                           |                             |                                       |
|                  |  |                       | 3          | 43600                           |                             |                                       |
|                  | 280  | 28                    | 1          | 48600                           | 49200                       | 19680                                 |
|                  |  |                       | 2          | 50600                           |                             |                                       |
|                  |  |                       | 3          | 48400                           |                             |                                       |

Tabla 4.47: Resultados obtenidos de ensayos de módulo de elasticidad a cilindros con agregados Tipo II,  $f_c=210 \text{ kgf/cm}^2$

| Probeta Nº1                     |                      | Probeta Nº2                     |                      |
|---------------------------------|----------------------|---------------------------------|----------------------|
| Esfuerzo (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Deformación unitaria | Esfuerzo (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Deformación unitaria |
| 6                               | 0,0000075            | 6                               | 0,0000125            |
| 11                              | 0,0000225            | 11                              | 0,000035             |
| 17                              | 0,00004              | 17                              | 0,0000625            |
| 23                              | 0,000065             | 23                              | 0,00009              |
| 28                              | 0,0000925            | 28                              | 0,000115             |
| 34                              | 0,0001125            | 34                              | 0,0001425            |
| 39                              | 0,00014              | 40                              | 0,000165             |
| 45                              | 0,0001625            | 46                              | 0,000195             |
| 51                              | 0,0001825            | 51                              | 0,000225             |
| 56                              | 0,00021              | 57                              | 0,00025              |
| 62                              | 0,000235             | 63                              | 0,0002975            |
| 68                              | 0,00026              | 68                              | 0,000315             |
| 73                              | 0,00028              | 74                              | 0,00034              |
| 79                              | 0,0003125            | 80                              | 0,00037              |
| 84                              | 0,0003275            | 85                              | 0,0003975            |
| 90                              | 0,0003525            | 91                              | 0,0004175            |
| 96                              | 0,000375             | 97                              | 0,00045              |



Gráfico N°15: Módulo de elasticidad de probeta N°1,  $f_c=210 \text{ kgf/cm}^2$

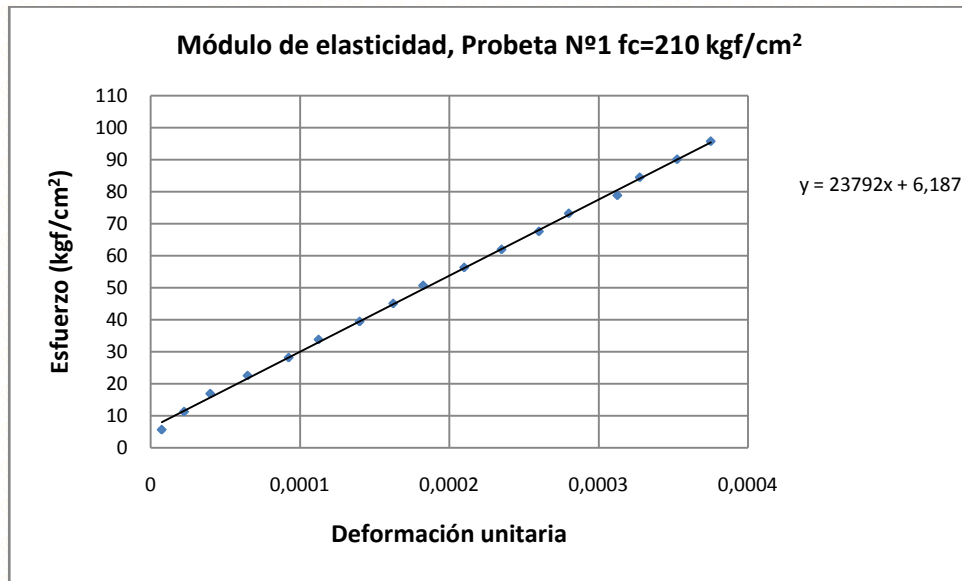


Gráfico N°16: Módulo de elasticidad de probeta N°2,  $f_c=210 \text{ kgf/cm}^2$

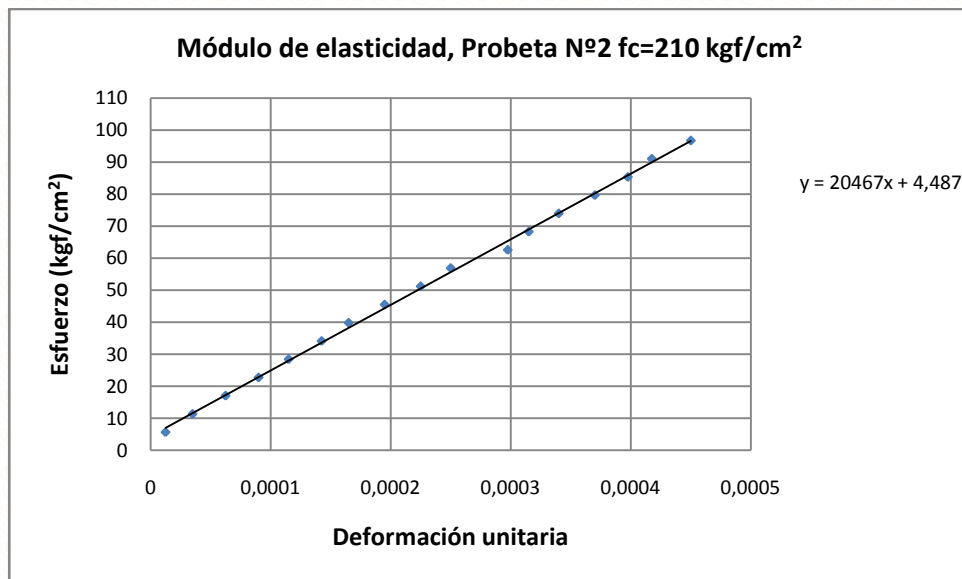


Tabla 4.48: Resultados obtenidos de ensayos de módulo de elasticidad a cilindros con agregados Tipo II,  $f_c=250 \text{ kgf/cm}^2$

| Probeta N°1                     |                      |
|---------------------------------|----------------------|
| Esfuerzo (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Deformación unitaria |
| 6                               | 0,0000075            |
| 11                              | 0,000025             |
| 17                              | 0,0000525            |
| 23                              | 0,0000825            |
| 28                              | 0,000105             |
| 34                              | 0,000135             |
| 40                              | 0,000165             |
| 45                              | 0,000195             |
| 51                              | 0,00022              |
| 57                              | 0,000245             |
| 63                              | 0,00027              |
| 68                              | 0,0003075            |
| 74                              | 0,0003325            |
| 80                              | 0,0003575            |
| 85                              | 0,0003925            |
| 91                              | 0,00042              |
| 97                              | 0,00045              |

| Probeta N°2                     |                      |
|---------------------------------|----------------------|
| Esfuerzo (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Deformación unitaria |
| 6                               | 0,0000125            |
| 11                              | 0,0000325            |
| 17                              | 0,000075             |
| 23                              | 0,000105             |
| 29                              | 0,0001375            |
| 34                              | 0,0001675            |
| 40                              | 0,00019              |
| 46                              | 0,00021              |
| 51                              | 0,0002575            |
| 57                              | 0,000285             |
| 63                              | 0,0003175            |
| 69                              | 0,0003425            |
| 74                              | 0,0003775            |
| 80                              | 0,0004075            |
| 86                              | 0,000435             |
| 91                              | 0,0004625            |
| 97                              | 0,0004925            |

Gráfico N°17: Módulo de elasticidad de probeta N°1,  $f_c=250 \text{ kgf/cm}^2$

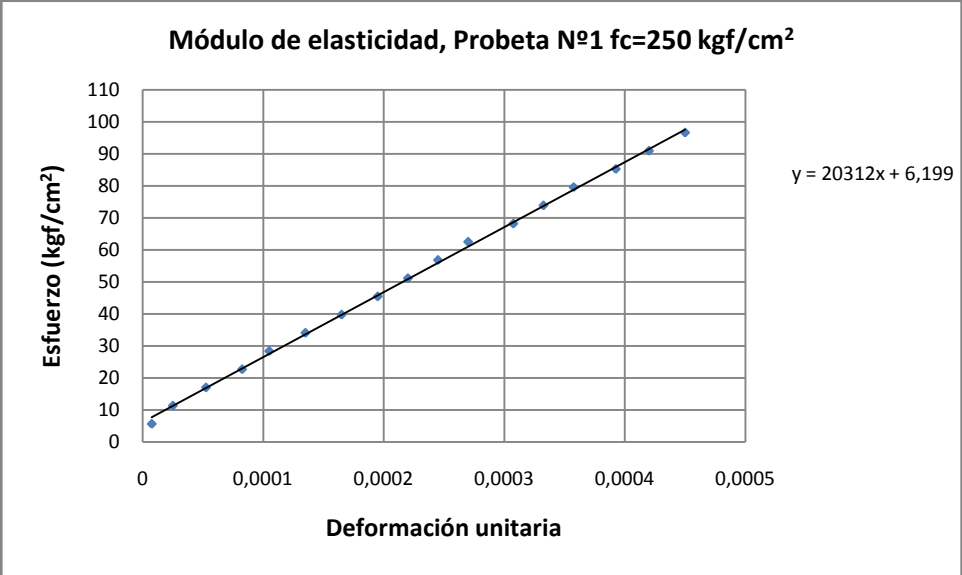


Gráfico N°18: Módulo de elasticidad de probeta N°2,  $f_c=250 \text{ kgf/cm}^2$

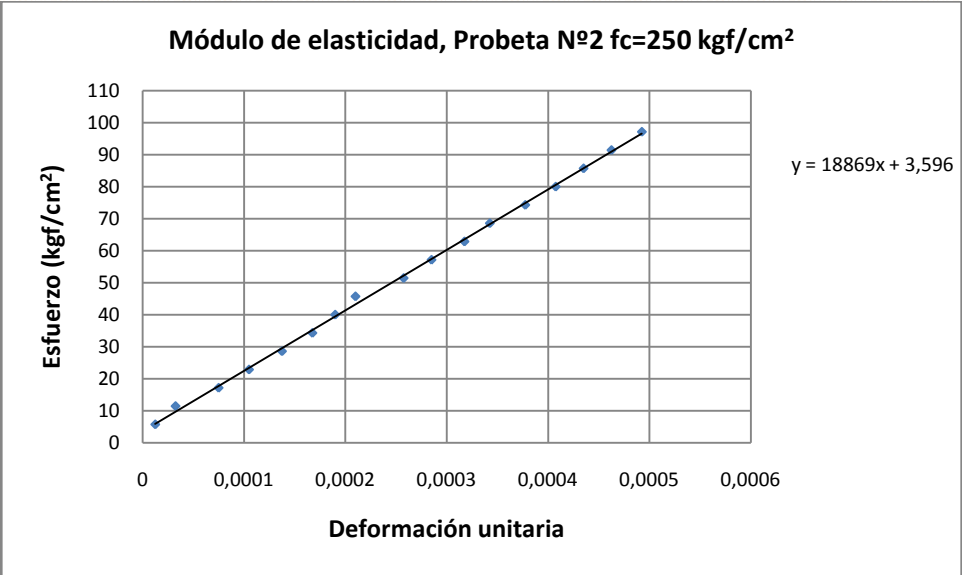


Tabla 4.49: Resultados obtenidos de ensayos de módulo de elasticidad a cilindros con agregados Tipo II,  $f_c=280 \text{ kgf/cm}^2$

| Probeta N°1                     |                      |
|---------------------------------|----------------------|
| Esfuerzo (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Deformación unitaria |
| 6                               | 0,00001              |
| 12                              | 0,00003              |
| 17                              | 0,0000575            |
| 23                              | 0,0000875            |
| 29                              | 0,0001125            |
| 35                              | 0,0001475            |
| 40                              | 0,00018              |
| 46                              | 0,0002175            |
| 52                              | 0,0002475            |
| 58                              | 0,000275             |
| 63                              | 0,0003125            |
| 69                              | 0,0003425            |
| 75                              | 0,0003625            |
| 81                              | 0,0003975            |
| 86                              | 0,00043              |
| 92                              | 0,000455             |
| 98                              | 0,0004825            |
| 104                             | 0,000515             |
| 109                             | 0,0005375            |

| Probeta N°2                     |                      |
|---------------------------------|----------------------|
| Esfuerzo (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Deformación unitaria |
| 6                               | 0,0000125            |
| 12                              | 0,0000375            |
| 17                              | 0,000055             |
| 23                              | 0,000085             |
| 29                              | 0,000115             |
| 35                              | 0,00014              |
| 40                              | 0,0001625            |
| 46                              | 0,0001825            |
| 52                              | 0,00022              |
| 58                              | 0,0002425            |
| 63                              | 0,000265             |
| 69                              | 0,0002975            |
| 75                              | 0,0003275            |
| 81                              | 0,00034              |
| 86                              | 0,0003675            |
| 92                              | 0,0003825            |
| 98                              | 0,000415             |
| 104                             | 0,000435             |
| 110                             | 0,0004675            |

Gráfico N°19: Módulo de elasticidad de probeta N°1,  $f_c=280 \text{ kgf/cm}^2$

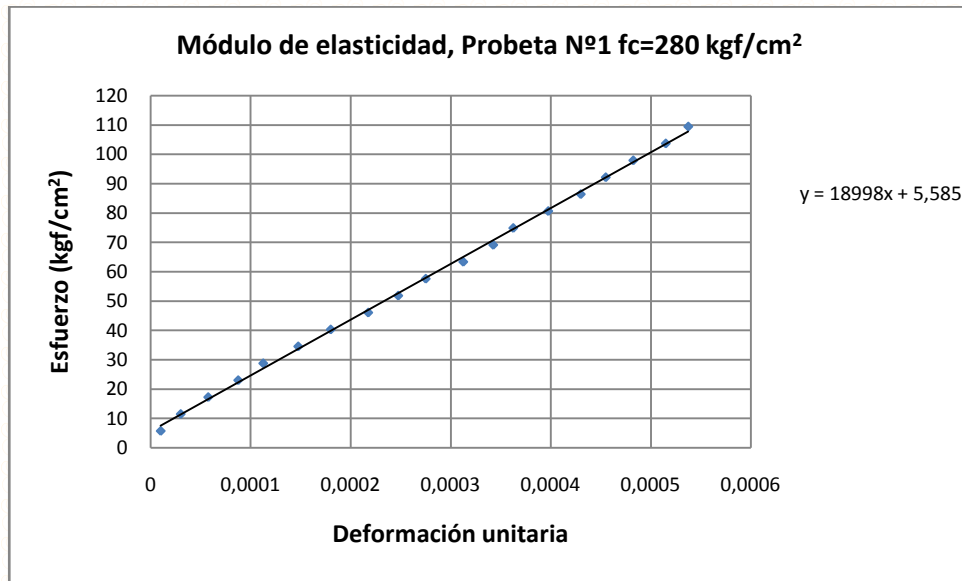
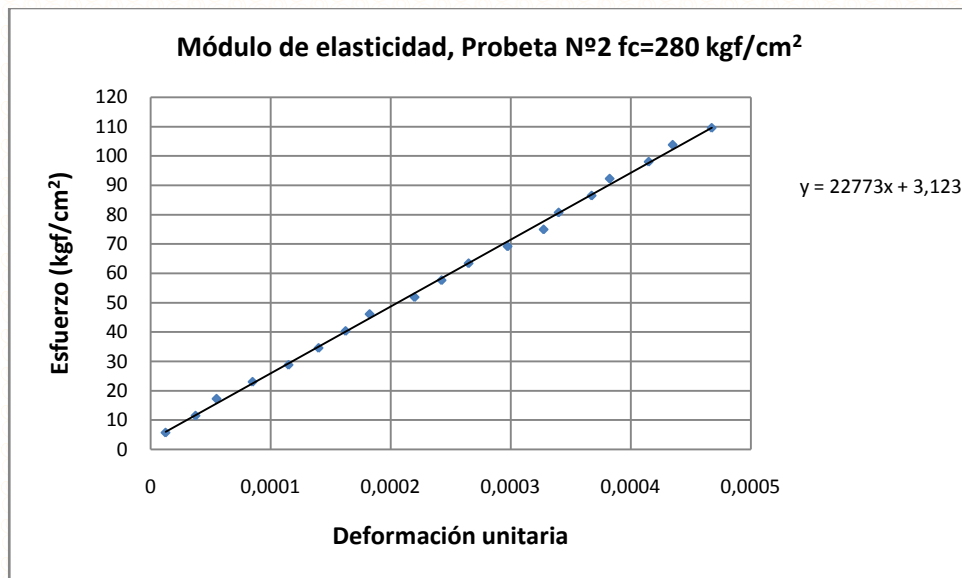


Gráfico N°20: Módulo de elasticidad de probeta N°2,  $f_c=280 \text{ kgf/cm}^2$



#### 4.3.7.3. Comparación de valores de módulo de elasticidad obtenidos teóricamente y de la aplicación del ensayo

Se calculó el módulo de elasticidad secante de las mezclas de concreto según la fórmula 12.8 del Manual del Concreto Estructural (Porrero, 2004), correspondiente a mezclas de concreto con valores de peso unitario entre 1440 y 2500 kgf/m<sup>3</sup>, la fórmula es la siguiente:

Fórmula N° 5: Módulo de elasticidad para concretos con peso unitario menor a 2300 kgf/m<sup>3</sup>

$$E_c = 0,137 \times (W)^{1,5} \times \sqrt{f_c}$$

Tabla 4.50: Módulo de elasticidad secante obtenido teóricamente de mezclas de concreto con diferentes tipos de agregados

|                           | Convencional             | Tipo I                   | Tipo II                  |
|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| fc (kgf/cm <sup>2</sup> ) | E (kgf/cm <sup>2</sup> ) | E (kgf/cm <sup>2</sup> ) | E (kgf/cm <sup>2</sup> ) |
| 210                       | 2,19E+05                 | 1,86E+05                 | 1,97E+05                 |
| 250                       | 2,39E+05                 | 2,02E+05                 | 2,14E+05                 |
| 280                       | 2,53E+05                 | 2,14E+05                 | 2,14E+05                 |

Tabla 4.51: Módulo de elasticidad secante obtenido de la aplicación del ensayo

| fc (kgf/cm <sup>2</sup> ) | E (kgf/cm <sup>2</sup> ) Agregado Tipo I |             |          | E (kgf/cm <sup>2</sup> ) Agregado Tipo II |             |          |
|---------------------------|--|-------------|----------|---|-------------|----------|
|                           | Probeta N°1                              | Probeta N°2 | Promedio | Probeta N°1                               | Probeta N°2 | Promedio |
| 210                       | 1,97E+05                                 | 1,75E+05    | 1,86E+05 | 2,72E+05                                  | 2,28E+05    | 2,50E+05 |
| 250                       | 2,11E+05                                 | 1,89E+05    | 2,00E+05 | 2,24E+05                                  | 2,09E+05    | 2,16E+05 |
| 280                       | 3,37E+05                                 | 1,96E+05    | 1,96E+05 | 2,11E+05                                  | 2,52E+05    | 2,32E+05 |



Los resultados obtenidos de la aplicación del ensayo a las probetas de la mezcla de resistencia de diseño de  $210 \text{ kgf/cm}^2$ , con agregados Tipo II, no son representativos del material, ya que la mezcla no se realizó con una granulometría adecuada, por lo que estos valores se descartan. A su vez, el ensayo realizado a la probeta N°1 de la mezcla de resistencia de  $280 \text{ Kgf/cm}^2$ , con agregados Tipo I, presentó mucha dispersión de los valores en la gráfica y los cálculos de módulo de elasticidad tampoco son considerados.

Los resultados teóricos del cálculo del módulo de elasticidad de las mezclas de concreto se compararon con los resultados obtenidos de la aplicación del ensayo a las probetas. Los valores comparados resultaron muy similares, por lo que se consideran como los valores representativos de mezclas de concreto con agregados reciclados.

## CONCLUSIONES

- El valor de asentamiento utilizado para el diseño de las mezclas de concreto fue de 8 cm, ya que se consideró como el valor usual para la construcción de estructuras.

Los valores de resistencia de diseño a la compresión simple a los 28 días, se establecieron en base a las resistencias utilizadas actualmente para mezclas de concreto.

Se establecieron tres valores de resistencia a la compresión simple para obtener curvas con mejor precisión, que permitieran evaluar diferentes parámetros de las mezclas de concreto.

El primer valor de resistencia se estableció en  $210 \text{ kgf/cm}^2$ , el cual corresponde al valor mínimo exigido actualmente para la construcción de elementos no estructurales como aceras, pavimentos, brocales, muros no estructurales. El segundo valor se estableció en  $280 \text{ kgf/cm}^2$ , correspondiente a un concreto de media a alta resistencia, con el fin de estudiar el comportamiento de los agregados reciclados en mezclas de resistencias elevadas. El siguiente valor se fijó en  $250 \text{ kgf/cm}^2$ , siendo un valor intermedio entre las resistencias establecidas anteriormente, y a su vez, corresponde a la resistencia de diseño más empleada en la práctica.

- Para el diseño de mezcla no se encontró algún método que considerara variables para agregados provenientes de residuos pétreos de materiales de construcción procesados. A su vez, el método de diseño de mezclas del Manual del Concreto Estructural (Porrero, 2004) considera factores de corrección

relacionados con algunas de las características de estos agregados. Por lo tanto, al utilizar este método se realizaron diseños de mezcla óptimos, ya que se establece la dosificación de la mezcla tomando en cuenta las características principales de los agregados, entre las cuales tenemos: peso específico y absorción, que representan la mayor diferencia entre los agregados residuales y los convencionales.

Las proporciones óptimas calculadas de cemento, agua y agregados se revisan en la Tabla 4.20.

- Las probetas de concreto realizadas con agregados Tipo I y Tipo II, ambas ensayadas a compresión, resistieron una determinada carga máxima a partir de la cual se calculó la resistencia a la compresión de cada probeta. El promedio de las resistencias obtenidas de las probetas de un mismo tipo de agregado y para cada valor de resistencia de diseño a los 28 días, fue mayor o igual en su mayoría, a los valores de resistencia estimados. Sin embargo, al realizar los respectivos cálculos estadísticos con los resultados obtenidos de resistencias, se observó que varios cilindros no cumplieron con los criterios de aceptación y rechazo.

Las mezclas elaboradas con agregados Tipo I presentaron un límite de resistencia a la compresión de aproximadamente  $260 \text{ kgf/cm}^2$ , mientras que en las mezclas elaboradas con agregados Tipo II no se llegó a conocer este límite, ya que presentaron un buen comportamiento para el valor máximo de resistencia estudiado, como se puede observar en el gráfico N° 8

A su vez, las mezclas de concreto elaboradas con agregados de residuos pétreos de materiales de construcción, alcanzan un valor de resistencia elevado a

edades tempranas, llegando a tener a los 7 días aproximadamente el 80% de la resistencia de diseño.

Los valores de resistencia a la tracción indirecta obtenidos luego de ensayar las diferentes probetas de concreto, en su mayoría, están en los límites esperados, sin embargo, los valores que están por debajo del límite de resistencia esperado es posible que hayan sido afectados por un mal posicionamiento de la probeta en la prensa de ensayo.

El ensayo de velocidad de propagación de onda en el concreto, arrojó resultados que se pueden tomar como satisfactorios. A menor tiempo, mayor velocidad de propagación de onda, mayor resistencia y mayor densidad del concreto. Según este criterio, el concreto realizado con agregados Tipo I resultó ser un concreto cuestionable mientras que el concreto realizado con agregados Tipo II resultó ser un concreto bueno.

En base a los resultados obtenidos de todos los ensayos realizados a los dos tipos de concreto estudiados, se puede concluir que el concreto realizado con agregados reciclados es un concreto que puede ser utilizado para realizar diferentes elementos como: aceras, brocales, algunos pavimentos, muros o paredes que no estén solicitadas por cargas excesivas y además para vigas corona y machones que soporten una pequeña estructura.

- Con mayores estudios, el concreto con agregados Tipo II puede evaluarse para ser utilizado en la construcción de elementos estructurales. A su vez, el concreto realizado con agregados Tipo I no puede ser utilizado para la construcción de elementos estructurales, ya que la composición de los agregados

y el comportamiento de las mezclas no representan valores aceptables para la elaboración de concretos de altas resistencias.

- Las mezclas elaboradas con agregados convencionales presentan el 90% de la cantidad de cemento requerida por las mezclas con agregados residuales, a su vez, en cuanto al contenido de agregados las mezclas con agregados residuales presentan el 87% de la dosis requerida por las convencionales, por lo que se genera un aumento en el costo de producción de mezclas convencionales respecto a las mezclas con agregados residuales.

Los agregados provenientes de residuos pétreos de materiales de construcción presentan una ventaja en el costo de elaboración, debido a que se pretende que los agregados sean adquiridos en plantas móviles de reciclaje instaladas en obras o zonas donde se encuentren en ejecución un conjunto de actividades de construcción ó demolición, reduciendo el costo relacionado al transporte del material. Las mezclas convencionales resultaron más costosas que las elaboradas con agregados residuales, son 23% más costosas respecto a las mezclas con agregados Tipo I y 28% más costosas respecto a las elaboradas con Tipo II.

- Los residuos pétreos de materiales de construcción como agregados para elaborar mezclas de concreto, en general, presentan características aceptables en: granulometría, contenido de impurezas orgánicas, peso unitario, contenido de partículas menores a 20 micras, resistencia al desgaste y contenido de cloruros y sulfatos. Las características más desfavorables son la absorción para ambos tipos de agregado y el contenido de partículas menores a 74 micras para el agregado Tipo I. Además, el comportamiento en las mezclas de concreto es muy bueno,



considerando la presencia de los materiales no recomendables, los cuales no se clasificaron para elaborar las mezclas.

Los resultados obtenidos de las características químicas y físico- mecánicas de los agregados reciclados y las mezclas de concreto elaboradas en Este Trabajo de Investigación, son representativos de los residuos pétreos de materiales de construcción, pero no pueden considerarse como valores usuales ó establecerse como valores normativos, ya que provienen de un número muy pequeño de ensayos. A su vez, esta investigación genera una iniciativa para seguir el estudio del comportamiento de estos materiales.

Los agregados finos y gruesos ocupan comúnmente de 60% a 75% del volumen del concreto (70% a 85% en peso), e influyen notablemente en las propiedades del concreto fresco y endurecido, en las proporciones de la mezcla, y en la economía.

Los residuos de concreto y otros materiales pétreos que componen a los elementos de las edificaciones ó construcciones civiles, al ser triturados son una fuente factible de agregados y una realidad económica donde escaseen agregados de calidad. Además, los materiales residuales como el acero pueden ser también reciclados para la elaboración de nuevos elementos.

El reciclaje de residuos de la construcción ofrece un amplio número de posibilidades para reducir el nivel de residuos y la contaminación. Está comprobado que una cantidad de material reciclado puede usarse para reemplazar las caras materias primas. Es cierto, que están las barreras de la tradición, pero hay que vencerlas para ilustrar que la reutilización de residuos de la construcción es el camino del futuro.



## RECOMENDACIONES

Si se desea realizar una mezcla de concreto utilizando como agregados residuos pétreos de materiales de construcción, es de gran relevancia que los agregados estén saturados con superficie seca, de ésta manera se logra que la mezcla de concreto sea más trabajable y a su vez, logra una buena interacción entre la pasta y los agregados, ya que los mismos no absorberán más agua y así se evita que la pasta de cemento y el mortero se resequen. De esta manera, se tendría una medida de seguridad de que el mortero o la pasta de cemento no presentarán retracción. Por otra parte, es necesario realizar ensayos donde se compruebe que al utilizar el agregado saturado con superficie seca, este no va a aportar una cantidad elevada de agua a la mezcla.

A la hora de la realización de las probetas de concreto, es sumamente importante compactar las capas de concreto que se van colocando según dice la norma, de esta manera se reducen las posibilidades de una presencia de cangrejera al desencofrar los cilindros de concreto. Por otra parte, luego de haber vaciado el concreto en la formaleta y haberlo compactado de una forma correcta, es necesario enrasar de manera adecuada la parte superior (cara de arriba) del cilindro, de esta forma cuando los cilindros se ensayen a compresión no presentarán fallas por enrase y así alcanzarán valores mayores de resistencia. Además, se recomienda aplicarle un capping a las caras del cilindro antes de realizar el ensayo a compresión, para nivelar y enrasar la superficie.

Los agregados residuales están compuestos por materiales que pueden comportarse como cementantes, es por esto que se recomienda realizar el ensayo de la Norma COVENIN 3135-1994 "Puzolanas. Determinación del índice de

actividad puzolánica”, con el cual se puede conocer el contenido de partículas cementantes que componen a estos materiales.

Además, se recomienda realizar los ensayos aplicados en este Trabajo de Investigación con un mayor número de muestras, para establecer los valores usuales correspondientes a los residuos pétreos de materiales de construcción procesados y mezclas de concreto realizadas con estos agregados. También, se deben realizar ensayos con muestras de residuos de diferentes obras en construcción y demolición, por separado, mezclados y aplicándoles una clasificación de los materiales no recomendables que los componen. A su vez, se recomienda estudiar mezclas de concreto compuestas con una combinación de agregados residuales y agregados convencionales.

Se debe profundizar el estudio de este material para utilizarse como agregados en mezclas de concreto para la construcción de elementos estructurales y como materiales para ser reutilizados en otros elementos de la construcción.

Es necesario que las autoridades controlen y coordinen las actividades de reciclaje para lograr que esta técnica sea aplicada por el sector de la construcción, para conseguir una disminución en la cantidad de residuos de la construcción y la contaminación que estos generan.

## REFERENCIAS

<http://html.rincondelvago.com/disenio-de-mezclas.html>. (s.f.). Recuperado el 14 de Mayo de 2008

[http://www.ambientum.com/revista/2003\\_03/escombros.htm](http://www.ambientum.com/revista/2003_03/escombros.htm). (s.f.). Recuperado el 03 de Junio de 2008

<http://www.arc-cat.net/es/altres/runes/>. (s.f.). Recuperado el 03 de Junio de 2008

<http://www.arqhys.com/construccion/mezcla-diseno.html>. (s.f.). Recuperado el 15 de Mayo de 2008

<http://www.concrecel.net/propiedades.php> . (s.f.). Recuperado el 15 de Mayo de 2008

[http://www.powercrusher.com/es/index.php?lan\\_id=3](http://www.powercrusher.com/es/index.php?lan_id=3). (s.f.). Recuperado el 03 de Junio de 2008

<http://www.reciclafutur.es/>. (s.f.). Recuperado el 16 de Junio de 2008

<http://www.rubblemaster.com/es/productos/rm80> . (s.f.). Recuperado el Junio 10 de 2008

[http://www.todoarquitectura.com/v2/v\\_ver\\_B.asp?t=EcoTA\\_006&d=n&t1=EcoTA&t2=Art%EDculo%20destacado](http://www.todoarquitectura.com/v2/v_ver_B.asp?t=EcoTA_006&d=n&t1=EcoTA&t2=Art%EDculo%20destacado). (s.f.). Recuperado el 07 de Junio de 2008

[powercrusher](#). (s.f.). Recuperado el 14 de Mayo de 2008

Porrero, J., Ramos, C., Grases, J., & Velazco, G. (2004). *Manual del Concreto Estructural*. Caracas.

<http://es.wikipedia.org/wiki/Puzolana>. (s.f.). Recuperado el 14 de Julio de 2008

<http://habitat.aq.upm.es/boletin/n2/aconst2.html#Piepag7>. (s.f.). Recuperado el 19 de Julio de 2008

<http://normas.imt.mx/NORMATIVA/j%20CMT/2%20Estructuras/01%20Mat%20Mamposterias/N-CMT-2-01-004-02.pdf>. (s.f.). Recuperado el 05 de Agosto de 2008

<http://www.brandenburg.com>. (s.f.). Recuperado el 17 de Julio de 2008

[http://www.construmatica.com/construpedia/Morteros.\\_Bloque\\_Termoarcilla](http://www.construmatica.com/construpedia/Morteros._Bloque_Termoarcilla). (s.f.). Recuperado el 18 de Agosto de 2008

<http://www.leyesvenezolanas.com/lpam.htm>. (s.f.). Recuperado el 25 de Agosto de 2008

[http://www.minamb.gob.ve/index.php?option=com\\_content&task=blogcategory&id=22&Itemid=98](http://www.minamb.gob.ve/index.php?option=com_content&task=blogcategory&id=22&Itemid=98). (s.f.). Recuperado el 19 de Julio de 2008

[http://www.minas.upm.es/relext/Red-Cyted-XIII/web-rimin/rimin1/jornadas/01ibermac\\_pdf/08\\_Calidad/Gaspar.pdf](http://www.minas.upm.es/relext/Red-Cyted-XIII/web-rimin/rimin1/jornadas/01ibermac_pdf/08_Calidad/Gaspar.pdf). (s.f.). Recuperado el 13 de Agosto de 2008

Pino y Ron. (1987). *Reciclaje del ladrillo de desecho como agregado para el concreto*. Caracas: UCV.

[http://www.uclm.es/area/ing\\_rural/Trans\\_const/Tema9.pdf](http://www.uclm.es/area/ing_rural/Trans_const/Tema9.pdf). (s.f.). Recuperado el 17 de Julio de 2008

<http://www.monografias.com/trabajos55/agregados/agregados2.shtml>. (s.f.). Recuperado el 17 de Octubre de 2008

Ingenieros, C. d. (Mayo de 2008). Guías de referencia de costos para la construcción.

Malhotra, V. M. *Non destructive methods for testing concrete*.

COVENIN. 1375-1979 *"Método de ensayo para determinar por secado el contenido de humedad total y superficial en el agregado"*.

COVENIN. 1468-1979 *"Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad en probetas cilíndricas de concreto"*.

COVENIN. 1681-1980 *"Método de ensayo para determinar la velocidad de propagación de ondas en el concreto"*.

COVENIN. 2385-2000 *"Concreto y mortero. Agua de mezclado. Requisitos"*.

COVENIN. 255-1998 *"Agregados. Determinación de la composición granulométrica"*.

COVENIN. 256-1977 *"Método de ensayo para la determinación cualitativa de impurezas orgánicas en arenas para concreto (ensayo clorimétrico)"*.

COVENIN. 258-1977 *"Método de ensayo para la determinación por lavado del contenido de materiales más finos que el cedazo COVENIN 74 micras en agregados minerales"*.

COVENIN. 259-1977 *"Método de ensayo para la determinación por suspensión de partículas menores de 20 micras en agregados finos"*.

COVENIN. 261-1977 *"Método de ensayo para la determinación cuantitativa de cloruros y sulfatos solubles en las arenas"*.

COVENIN. 263-1978 *"Método de ensayo para la determinación del peso unitario del agregado"*.

COVENIN. 268-1998 *"Agregado fino. Determinación de la densidad y la absorción"*.

COVENIN. 269-1998 *"Agregado grueso. Determinación de la densidad y la absorción"*.

COVENIN. 273-1998 *"Concreto, Mortero y componentes. Terminología"*.

COVENIN. 274-1978 *"Método para determinar los vacíos en agregados"*.

COVENIN. 277-2000 *"Concreto. Agregados. Requisitos"* .

COVENIN. 3135-1994 *"Puzolanas. Determinación del índice de actividad puzolánica"*.

COVENIN. 338-2002 *"Concreto. Método para la elaboración, curado y ensayo a compresión de cilindros de concreto"*.



COVENIN. 339-2003 *"Concreto. Método para la medición del asentamiento con el cono de Abrams"*.

COVENIN. 341-1979 *"Método de ensayo para determinar la resistencia a la tracción indirecta del concreto usando probetas cilíndricas"*.