

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



**ESTUDIO TECNOLÓGICO DEL CONCRETO $f'_c = 250 \text{ kg/cm}^2$
ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS USADOS EN
EDIFICACIONES**

TESIS

Para optar el Título Profesional de

INGENIERO CIVIL

Presentado por:

M.Sc. Héctor Arturo Cuadros Rojas

Asesor:

M. en I. Héctor Albarino Perez Loayza

Cajamarca, Perú

2018

AGRADECIMIENTO

Este trabajo no pudo haber sido posible sin la guía y apoyo de muchos individuos e instituciones. En primer lugar, agradezco infinitamente a mis padres y hermanos. Su apoyo incondicional, sabiduría y optimismo siempre me han permitido superar desafíos y ser un mejor ser humano. Un agradecimiento especial a mi querida Ali Rodríguez, por alentarme y exigirme constantemente hasta terminar este proyecto.

Estoy muy agradecido con mi asesor, M. en I. Héctor Pérez Loayza, quien me ha guiado en todo momento hasta culminar esta investigación. Su vasta experiencia y conocimiento me ha permitido desarrollar la tesis de la mejor manera posible en el tiempo programado.

Agradezco al comité de revisión de tesis: Dra. Ing. Rosa Llique M., M.Cs. Ing. Marco Silva S. e Ing. Marco Hoyos S., por sus valiosas recomendaciones durante el desarrollo del presente estudio. En general, agradezco a la Universidad Nacional de Cajamarca, en especial a la Facultad de Ingeniería, por haberme acogido en sus aulas y haberme brindado los conocimientos necesarios para ser un profesional de calidad.

Finalmente, dos personas más merecen un reconocimiento especial. Leiner Guerrero, encargado del Laboratorio de Mecánica de Materiales, por haberme facilitado el uso del mismo, inclusive durante días no laborables. Muy agradecido con el Ing. Eduardo Urteaga, Gerente de Operaciones de la empresa Hurteco, por su invaluable asesoramiento.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTO	ii
CONTENIDO	iii
LISTA DE TABLAS	ix
LISTA DE CUADROS.....	x
LISTA DE FIGURAS.....	xiii
NOTACIONES.....	xiv
ACRÓNIMOS	xv
RESUMEN	xvi
ABSTRACT.....	xvii
CAPITULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento del problema.....	1
1.2. Formulación del problema	2
1.3. Hipótesis	2
1.4. Variables	2
1.4.1. Variable independiente	2
1.4.2. Variable dependiente	2
1.5. Justificación de la investigación	4
1.6. Delimitación de la investigación.....	4
1.7. Limitaciones.....	5
1.8. Objetivos	5
1.8.1. Objetivo general.....	5
1.8.2. Objetivos específicos	5
1.9. Descripción del contenido de los capítulos.....	6
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO	7
2.1. Antecedentes teóricos	7
2.1.1. Antecedentes internacionales.....	7
2.1.2. Antecedentes nacionales	9
2.1.3. Antecedentes locales	9
2.2. Bases teóricas.....	10
2.2.1. Concreto.....	10
2.2.2. Agregados	10
2.2.2.1. Granulometría	11

2.2.2.2.	Perfil y textura.....	13
2.2.2.3.	Porosidad.....	13
2.2.2.3.1.	Absorción.....	14
2.2.2.4.	Sustancias perjudiciales	15
2.2.2.5.	Densidad promedio de partículas (no incluye orificios entre partículas), densidad relativa (peso específico).....	16
2.2.2.6.	Densidad de masa (peso unitario) y vacíos	19
2.2.2.7.	Intemperismo y abrasión	21
2.2.2.8.	Contenido de humedad.....	22
2.2.3.	Agregados de Concreto Reciclado (ACR).....	23
2.2.3.1.	Fuentes de residuos y producción de ACR	23
2.2.3.2.	Propiedades del ACR	24
2.2.3.2.1.	Densidad relativa	24
2.2.3.2.2.	Granulometría	24
2.2.3.2.3.	Abrasión en la máquina de Los Ángeles	25
2.2.3.2.4.	Forma y textura superficial.....	25
2.2.3.2.5.	Densidad y absorción.....	25
2.2.4.	Concreto fresco	26
2.2.4.1.	Trabajabilidad	26
2.2.4.2.	Contenido de aire	26
2.2.4.3.	Densidad.....	26
2.2.5.	Concreto endurecido	27
2.2.5.1.	Resistencia a compresión	27
2.2.5.2.	Módulo de elasticidad (E_c)	29
2.2.5.3.	Módulo de rotura (M_r).....	30
2.2.5.4.	Correlación entre el módulo de rotura y la resistencia a la compresión.....	30
2.2.6.	Diseño de mezcla	31
2.3.	Definición de términos básicos	32
CAPITULO III: MATERIALES Y MÉTODOS.....		35
3.1.	Ubicación geográfica	35
3.2.	Diseño de la investigación	35
3.3.	Población, muestra, unidades de análisis y unidad de observación	37
3.4.	Matriz de consistencia metodológica.....	37
3.5.	Materiales y equipos	37

3.5.1. Materiales.....	37
3.5.1.1. Agregados Naturales	37
3.5.1.2. Agregado de concreto reciclado.....	39
3.5.1.3. Cemento	39
3.5.1.4. Agua	39
3.5.2. Equipos	40
3.6. Procedimiento	40
3.6.1. Etapa de campo	40
3.6.1.1. Procesamiento del ACR.....	40
3.6.2. Etapa de laboratorio	41
3.6.2.1. Propiedades físico-mecánicas de los agregados.....	41
3.6.2.1.1. Análisis granulométrico.....	42
3.6.2.1.2. Densidad promedio de partículas (sin orificios entre partículas) y densidad relativa (peso específico) del agregado grueso.....	42
3.6.2.1.3. Densidad promedio de partículas (sin orificios entre partículas) y densidad relativa (peso específico) del agregado fino.....	43
3.6.2.1.4. Absorción.....	44
3.6.2.1.5. Densidad de masa y vacíos	44
3.6.2.1.6. Resistencia a la abrasión del agregado grueso.....	46
3.6.2.1.7. Material más fino que pasa por el tamiz de 75 µm (Nº 200).....	46
3.6.2.1.8. Contenido de humedad	47
3.6.2.2. Concreto fresco	48
3.6.2.3. Concreto endurecido	49
3.6.2.3.1. Resistencia a compresión.....	49
3.6.2.3.2. Módulo de elasticidad.....	50
3.6.2.3.3. Resistencia a flexión	50
3.6.3. Etapa de gabinete	51
3.6.3.1. Diseño de mezcla del concreto de control.....	52
3.6.3.2. Diseño de mezcla del concreto con ACR.....	55
3.7. Tratamiento y análisis de datos y presentación de resultados.....	55
CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	57
4.1. Presentación de resultados	57
4.1.1. Propiedades físico-mecánicas de los agregados	57
4.1.1.1. Análisis granulométrico de los agregados gruesos	57

4.1.1.2.	Análisis granulométrico de los agregados finos.....	59
4.1.1.3.	Densidad promedio de partículas (sin orificios entre partículas), densidad relativa (peso específico) y absorción	62
4.1.1.4.	Densidad de masa y vacíos	62
4.1.1.5.	Resistencia a la abrasión del agregado.....	62
4.1.1.6.	Material más fino que pasa por el tamiz de 75 μm (N ^o 200)	63
4.1.1.7.	Contenido de humedad.....	63
4.1.2.	Diseños de mezcla.....	64
4.1.3.	Concreto fresco	65
4.1.4.	Concreto endurecido	66
4.1.4.1.	Resistencia a la compresión	66
4.1.4.1.1.	Resultados del concreto de control	66
4.1.4.1.2.	Resultados del concreto con PR del 20%	67
4.1.4.1.3.	Resultados del concreto con PR del 30%	68
4.1.4.1.4.	Resultados del concreto con PR del 40%	69
4.1.4.1.5.	Resultados del concreto con PR del 50%	69
4.1.4.1.6.	Resultados del concreto con PR del 100%	70
4.1.4.1.7.	Resumen de los resultados del ensayo de resistencia a compresión	71
4.1.4.1.8.	Cálculo del módulo de elasticidad (E_c).....	73
4.1.4.2.	Resistencia a flexión	74
4.1.4.3.	Correlación del módulo de rotura y la resistencia a compresión	75
4.2.	Análisis, interpretación y discusión de resultados	75
4.2.1.	Propiedades físico-mecánicas de los agregados	75
4.2.1.1.	Análisis granulométrico	75
4.2.1.2.	Densidad y absorción	76
4.2.1.3.	Resistencia a la abrasión del agregado.....	76
4.2.1.4.	Material más fino que pasa por el tamiz de 75 μm (N ^o 200)	77
4.2.2.	Diseños de mezcla.....	77
4.2.3.	Concreto fresco	78
4.2.4.	Concreto endurecido	78
4.2.4.1.	Resistencia a la compresión	78
4.2.4.1.1.	Análisis del tipo de falla	78
4.2.4.1.2.	Concreto de control.....	78

4.2.4.1.3. Concreto con PR del 20%.....	79
4.2.4.1.4. Concreto con PR del 30%.....	80
4.2.4.1.5. Concreto con PR del 40%.....	81
4.2.4.1.6. Concreto con PR del 50%.....	81
4.2.4.1.7. Concreto con PR del 100%.....	82
4.2.4.1.8. Discusión de los resultados de resistencia a compresión.....	83
4.2.5. Módulo de elasticidad (E_c) vs módulo de elasticidad teórico (E_{c1}).....	83
4.2.6. Resistencia a flexión	84
4.3. Contrastación de hipótesis	84
4.4. Evaluación económica de la investigación	85
CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	86
5.1. Conclusiones	86
5.2. Recomendaciones	87
CAPITULO VI: REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA	88
ANEXOS.....	93
ANEXO A – PANEL FOTOGRÁFICO	93
ANEXO B – PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE LOS AGREGADOS..	100
AGREGADO GRUESO NATURAL (AGR).....	100
AGREGADO GRUESO RECICLADO (AGR).....	106
AGREGADO FINO NATURAL (AFN).....	112
AGREGADO FINO RECICLADO (AFR)	125
ANEXO C – DISEÑOS DE MEZCLA DEL CONCRETO	131
DISEÑO DE MEZCLA DEL CONCRETO PATRÓN.....	131
AJUSTE DE LAS PROPORCIONES DE DISEÑO POR AGUA ADICIONAL, ASENTAMIENTO, CONTENIDO DE AIRE Y APARIENCIA.....	135
AJUSTE DE LAS PROPORCIONES DE DISEÑO POR RESISTENCIA.....	138
DISEÑO DE MEZCLA DEL CONCRETO PATRÓN CORREGIDO EL MÓDULO DE FINURA DEL AGREGADO FINO NATURAL	141
DISEÑO DE MEZCLA DEL CONCRETO REEMPLAZANDO EL AGREGADO NATURAL POR AGREGADO RECICLADO AL 20%	145
DISEÑO DE MEZCLA DEL CONCRETO REEMPLAZANDO EL AGREGADO NATURAL POR AGREGADO RECICLADO AL 30%	149
DISEÑO DE MEZCLA DEL CONCRETO REEMPLAZANDO EL AGREGADO NATURAL POR AGREGADO RECICLADO AL 40%	153

DISEÑO DE MEZCLA DEL CONCRETO REEMPLAZANDO EL AGREGADO NATURAL POR AGREGADO RECICLADO AL 50%	157
DISEÑO DE MEZCLA DEL CONCRETO REEMPLAZANDO EL AGREGADO NATURAL POR AGREGADO RECICLADO AL 100%	161
ANEXO D – PROGRAMACIÓN DE ELABORACIÓN Y ROTURA DEL CONCRETO.....	165
ANEXO E – CÁLCULO DE DENSIDADES DEL CONCRETO FRESCO.....	168
ANEXO F – RESISTENCIA A COMPRESIÓN INDIVIDUAL DE ESPECIMENES CILÍNDRICOS	169
ANEXO F – MÓDULO DE RETURA DE ESPECIMENES PRISMÁTICOS	174
ANEXO G – ESFUERZO VS DEFORMACIÓN UNITARIA.....	175

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Granulometría del agregado fino	11
Tabla 2.2 Granulometría del agregado grueso	12
Tabla 2.3 Precisión de los resultados de absorción de los agregados grueso y fino.....	14
Tabla 2.4 Precisión de los resultados de material más fino que 75 μm (N° 200) de los agregados grueso y fino	15
Tabla 2.5 Límites para sustancias deletéreas en los agregados fino y grueso	16
Tabla 2.6 Precisión de los resultados de densidad y densidad relativa del agregado grueso	18
Tabla 2.7 Precisión de los resultados de densidad y densidad relativa del agregado fino	19
Tabla 2.8 Densidad del agua	20
Tabla 2.9 Precisión de los resultados de densidad de masa de los agregados grueso y fino	21
Tabla 2.10 Tolerancia de rotura de especímenes de concreto	27

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1.1 Operacionalización de variables	3
Cuadro 1.2 Testigos cilíndricos y prismáticos probados en laboratorio.....	5
Cuadro 3.1 Matriz de consistencia metodológica.....	38
Cuadro 3.2 Suposiciones de diseño	52
Cuadro 4.1 Análisis granulométrico promedio del AGN	58
Cuadro 4.2 Análisis granulométrico promedio del AGR	58
Cuadro 4.3 Análisis granulométrico promedio del AFN original de cantera (1)	60
Cuadro 4.4 Análisis granulométrico promedio del AFN tamizado (2).....	60
Cuadro 4.5 Análisis granulométrico promedio del AFN lavado (3).....	61
Cuadro 4.6 Análisis granulométrico promedio del AFR	61
Cuadro 4.7 Resumen de densidades promedio de partículas, densidades relativas y absorción de los agregados naturales y reciclados.....	62
Cuadro 4.8 Densidad de masa y vacíos de los agregados naturales y reciclados.....	62
Cuadro 4.9 Resistencia a la abrasión del agregado grueso natural y reciclado	63
Cuadro 4.10 Material más fino que el tamiz de 75 μm (N° 200)	63
Cuadro 4.10 Contenido de humedad, %	64
Cuadro 4.11 Diseños de mezcla.....	64
Cuadro 4.12 Propiedades del concreto fresco.....	65
Cuadro 4.13 Resistencia a compresión, desviación estándar y varianza – concreto de control	66
Cuadro 4.14 Resistencia a compresión, desviación estándar y varianza – PR 20%.....	67
Cuadro 4.15 Resistencia a compresión, desviación estándar y varianza – PR 30%.....	68
Cuadro 4.16 Resistencia a compresión, desviación estándar y varianza – PR 40%.....	69
Cuadro 4.17 Resistencia a compresión, desviación estándar y varianza – PR 50%.....	70
Cuadro 4.18 Resistencia a compresión, desviación estándar y varianza – PR 100%.....	70
Cuadro 4.19 Resultados de las resistencias a compresión, kg/cm^2	71
Cuadro 4.20 Reducción de la resistencia a compresión del concreto con ACR en relación al concreto de control, %	71
Cuadro 4.21 Relación de las resistencias del concreto a los 28 días con el f^c y el f^{cr} , %	71
Cuadro 4.22 Factor de relación de las resistencias a los 14 y 28 días con las resistencias a los 7 días	73

Cuadro 4.22 Módulo de elasticidad (E_c) utilizando el gráfico, kg/cm^2	74
Cuadro 4.23 Módulo de elasticidad (E_{c1}) por ecuación del ACI, kg/cm^2	74
Cuadro 4.24 Resultados del ensayo de resistencia a flexión – PR 0% y PR 20%.....	74
Cuadro 4.25 Cálculo de la constante a de la correlación del M_r y \bar{X}	75
Cuadro 4.26 Costos de investigación.....	85
Cuadro B.1 Análisis granulométrico del AGN N° 1	100
Cuadro B.2 Análisis granulométrico del AGN N° 2	101
Cuadro B.3 Análisis granulométrico del AGN N° 3	102
Cuadro B.4 Densidad relativa y absorción del AGN.....	103
Cuadro B.5 Densidad de masa y vacíos del AGN	104
Cuadro B.6 Contenido de humedad del AGN	105
Cuadro B.7 Resistencia a la abrasión del AGN	105
Cuadro B.8 Análisis granulométrico del AGR N° 1.....	106
Cuadro B.9 Análisis granulométrico AGR N° 2	107
Cuadro B.10 Análisis granulométrico AGR N° 3	108
Cuadro B.11 Densidad relativa y absorción del AGR.....	109
Cuadro B.12 Densidad de masa y vacíos del AGR	110
Figura B.1 Contenido de humedad del AGR.....	111
Cuadro B.14 Resistencia a la abrasión del AGR	111
Cuadro B.15 Cantidad de material más fino que el tamiz de $75 \mu\text{m}$ del AGR.....	111
Cuadro B.16 Análisis granulométrico del AFN original N° 1.....	112
Cuadro B.17 Análisis granulométrico AFN original N° 2	113
Cuadro B.18 Análisis granulométrico del AFN original N° 3.....	114
Cuadro B.19 Análisis granulométrico del AFN tamizado N° 1	115
Cuadro B.20 Análisis granulométrico AFN tamizado N° 2	116
Cuadro B.21 Análisis granulométrico del AFN tamizado N° 3	117
Cuadro B.22 Análisis granulométrico del AFN lavado N° 1	118
Cuadro B.23 Análisis granulométrico AFN lavado N° 2	119
Cuadro B.24 Análisis granulométrico del AFN lavado N° 3	120
Cuadro B.25 Densidad relativa y absorción del AFN	121
Cuadro B.26 Densidad de masa y vacíos del AFN.....	122
Cuadro B.27 Contenido de humedad del AFN original.....	123
Cuadro B.28 Contenido de humedad del AFN tamizado	123
Cuadro B.29 Cantidad de material más fino que el tamiz de $75 \mu\text{m}$ del AFN original	123

Cuadro B.30 Cantidad de material más fino que el tamiz de 75 μm del AFN tamizado	124
Cuadro B.31 Análisis granulométrico del AFR N° 1	125
Cuadro B.32 Análisis granulométrico AFR N° 2	126
Cuadro B.33 Análisis granulométrico del AFR N° 3	127
Cuadro B.34 Densidad relativa y absorción del AFR.....	128
Cuadro B.35 Densidad de masa y vacíos del AFR.....	129
Cuadro B.36 Contenido de humedad del AFR	130
Cuadro B.37 Cantidad de material más fino que el tamiz de 75 μm del AFN original	130

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Esquema de los patrones tipos de fracturas.....	28
Figura 3.1 Localización de canteras y laboratorio.....	35
Figura 3.2. Diagrama del dispositivo para la prueba de flexión del concreto	51
Figura 4.1 Curvas granulométricas de los agregados gruesos	57
Figura 4.2 Curvas granulométricas de los agregados finos	59
Figura 4.3 Densidad y contenido de aire del concreto fresco vs. PR, %	66
Figura 4.4 Resultados de resistencia a compresión y densidad vs. PR, %	72
Figura 4.5 Curvas de esfuerzo (S) vs deformación unitaria (ϵ).....	73
Figura 4.6 Prueba de normalidad - PR 0% para 7, 14 y 28 días	79
Figura 4.7 Prueba de normalidad - PR 20% para 7, 14 y 28 días	80
Figura 4.9 Prueba de normalidad - PR 40% para 7, 14 y 28 días.....	81
Figura 4.10 Prueba de normalidad - PR 50% para 7, 14 y 28 días	82
Figura 4.11 Prueba de normalidad - PR 100% para 7, 14 y 28 días	82
Figura B.1 Curva granulométrica del AGN N° 1	100
Figura B.2 Curva granulométrica del AGN N° 2	101
Figura B.3 Curva granulométrica del AGN N° 3	102
Figura B.4 Curva granulométrica del AGR N° 1.....	106
Figura B.5 Curva granulométrica del AGR N° 2.....	107
Figura B.6 Curva granulométrica del AGR N° 3.....	108
Figura B.7 Curva granulométrica del AFN original N° 1.....	112
Figura B.8 Curva granulométrica del AFN original N° 2.....	113
Figura B.9 Curva granulométrica del AFN original N° 3.....	114
Figura B.10 Curva granulométrica del AFN tamizado N° 1	115
Figura B.11 Curva granulométrica del AFN tamizado N° 2	116
Figura B.12 Curva granulométrica del AFN tamizado N° 3	117
Figura B.13 Curva granulométrica del AFN lavado N° 1	118
Figura B.14 Curva granulométrica del AFN lavado N° 2	119
Figura B.15 Curva granulométrica del AFN lavado N° 3	120
Figura B.16 Curva granulométrica del AFR N° 1	125
Figura B.17 Curva granulométrica del AFR N° 2	126
Figura B.18 Curva granulométrica del AFR N° 3	127

NOTACIONES

- a = Constante que varía normalmente entre 1.9 – 3.18 para resistencias en kg/cm^2 a 28 días. En este caso se utilizará un valor promedio de 2.54.
- D_c = Densidad del concreto, kg/m^3 .
- f'_c = Resistencia a compresión del concreto de diseño, kg/cm^2 .
- f'_{cr} = Resistencia a compresión promedio requerida del concreto utilizada para la selección de las proporciones del concreto, kg/cm^2 .
- ε = Deformación unitaria, mm/mm .
- E_c = Módulo de elasticidad del concreto, kg/cm^2 .
- M_r = Módulo de rotura, kg/cm^2 .
- m = Módulo de finura de la combinación de agregados.
- m_f = Módulo de finura del agregado fino.
- m_g = Módulo de finura del agregado grueso.
- n = Número de muestras en un registro.
- S = Esfuerzo unitario, kg/cm^2 .
- s = Desviación estándar de la muestra, un estimado de la desviación estándar de la desviación. También llamada $s_{general}$.
- V = Coeficiente de variación.
- \bar{X} = Promedio de los resultados de las pruebas de esfuerzo, también llamado media.
- X_i = Un resultado de la prueba de esfuerzo.

ACRÓNIMOS

- ACR = Agregado de concreto reciclado.
- AFN = Agregado fino natural.
- AFR = Agregado fino reciclado.
- AGN = Agregado grueso natural.
- AGR = Agregado grueso reciclado.
- AN = Agregado natural.
- AR = Agregado reciclado.
- ASR = Reactividad álcali-sílice, del inglés *Alkali-silice reaction*.
- ASTM = Estándares ASTM, del inglés *American Society for Testing and Materials*.
- NTP = Normas Técnicas Peruanas.
- PR = Porcentaje de reemplazo.
- RCD = Residuos de construcción y demolición.
- TMN = Tamaño Máximo Nominal.

RESUMEN

La presente investigación estudia el concreto normal $f_c=250 \text{ kg/cm}^2$ elaborado con agregados reciclados (ACR) obtenido de la demolición de una edificación en los Baños del Inca. Se reemplazó por volumen el agregado natural por agregado de concreto reciclado (ACR) al 20%, 30%, 40%, 50% y 100%. Específicamente, se determinaron y compararon las propiedades físico-mecánicas de los agregados, se diseñaron las mezclas del concreto mediante el método del módulo de finura de la combinación de agregados y se analizaron los ensayos del concreto fresco y endurecido. La investigación tiene un enfoque cuantitativo del tipo aplicado con un diseño experimental puro que abarca un grupo de control (concreto de control) y cinco grupos experimentales que corresponden a los especímenes elaborados con agregado reciclado, cuatro de ellos ensayados a los 7, 14 y 28 días y el grupo del 100% de reemplazo ensayado a los 28 días. En total, se elaboraron 99 especímenes cilíndricos y 12 especímenes prismáticos ensayados a flexión a los 28 días: 6 elaborados con el diseño del concreto de control y seis con el diseño que muestra el mejor comportamiento a compresión. El resultado más importante señala que las resistencias a compresión a los 28 días del concreto con ACR disminuyen en relación a la resistencia del concreto de control en 10%, 12%, 16%, 16% y 19% en todos los casos de reemplazo. Además, las resistencias del concreto usando ACR superan la resistencia de diseño $f_c = 250 \text{ kg/cm}^2$ y están alrededor de la resistencia promedio $f_{cr} = 300 \text{ kg/cm}^2$. Adicionalmente, la densidad del ACR afecta la resistencia mecánica del concreto, la cual disminuye a medida que la cantidad de ACR aumenta en la mezcla. En este sentido, se concluye que el ACR califica para ser utilizado en la elaboración de concreto para edificaciones.

Palabras claves: agregado de concreto reciclado (ACR), propiedades físico-mecánicas, resistencia a compresión, densidad del concreto fresco.

ABSTRACT

This research studies the normal concrete $f_c = 250 \text{ kg/cm}^2$ made with recycled aggregates (ACR) obtained from the demolition of a building in the Baños del Inca. The natural aggregate was replaced by volume by adding recycled concrete (ACR) at 20%, 30%, 40%, 50% and 100%. Specifically, the physico-mechanical properties of the aggregates were determined and compared, the concrete mixtures were designed by the method of the completion module of the aggregate combination and the tests of the fresh and hardened concrete were oriented. The research has a quantitative approach of the type applied with a pure experimental design that includes a control group and five experimental groups that correspond to the specimens made with a recycled compound, four of them tested at 7, 14 and 28 days and the group 100% replacement tested at 28 days. In total, 99 cylindrical specimens and 12 prismatic specimens tested to flexion were prepared at 28 days: 6 made with the design of the control concrete and six with the design that shows the best compression behavior. The result was more important than the resistance at 28 days of concrete with ACR decreased in relation to concrete control resistance by 10%, 12%, 16%, 16% and 19% in all replacement cases. In addition, concrete resistors using ACR exceed the design resistance $f_c = 250 \text{ kg / cm}^2$ and are around the average resistance $f_{cr} = 300 \text{ kg / cm}^2$. Additionally, the density of the ACR affects the mechanical strength of the concrete, which decreases as the amount of ACR increases in the mixture. In this sense, it is concluded that the ACR qualifies to be used in the construction of concrete for buildings.

Key words: recycled concrete aggregate (RCA), physico-mechanical properties, compressive strength, concrete density.

ESTUDIO TECNOLÓGICO DEL CONCRETO $f'_c=250 \text{ kg/cm}^2$ ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS USADOS EN EDIFICACIONES

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema

Actualmente, la población mundial rodea los 7,500 millones de personas, un poco más de 9 veces los 800 millones estimados a inicios de la Revolución Industrial. A un ritmo de crecimiento de 75 millones de personas al año (Sachs, 2015), se espera que se superen los 10 mil millones a finales del siglo XXI (Roser & Ortiz-Ospina, 2016). Con el crecimiento poblacional y el desarrollo económico, se intensifica la escasez de recursos naturales y la generación de residuos. En especial, los materiales utilizados en el sector construcción representan cerca de la mitad de los materiales utilizados y cerca de la mitad de los residuos sólidos generados en todo el mundo (Edge Environment Pty Ltd, 2012).

En un intento por reducir la cantidad de residuos de construcción y demolición (en adelante RCD) y gestionar los residuos como un recurso, algunos países han incluido normativas para fortalecer la recuperación de RCD de forma segura, científica y ecológica. Holanda y Alemania, por ejemplo, están utilizando los residuos de construcción como nuevos productos de infraestructura en un 100% siempre que sean validados con investigaciones (Rozo, 2012). Finlandia tiene una fuerte legislación para reciclar todos los materiales de una demolición. Estados Unidos utilizó concreto reciclado en proyectos no estructurales de infraestructura vial de aeropuertos, carreteras, y puentes. Denver y Atlanta, por ejemplo, reutilizaron los escombros de la demolición estructural como agregado de concreto en la remodelación y expansión de sus aeropuertos. Hong Kong, además, reemplazó el agregado natural en la mayoría del concreto estructural del Parque de los Humedales con concreto reciclado (Mayer, 2012 en Rozo, 2012).

A diferencia de estas buenas prácticas, el Perú carece de infraestructura y normativa que regule la gestión y reaprovechamiento de RCD. En el 2007, se tuvo una producción nacional de RCD de aproximadamente 5.6 millones TM, de los cuales el 75% fueron escombros, los mismos que contienen 12% de concreto y 5% de piedra (Ministerio del Ambiente, 2008), incrementando significativamente la carga en los rellenos sanitarios que actualmente son escasos en el país; peor aún, el Perú no cuenta con escombreras para

disponer los RCD. La falta de ellas genera que los residuos de construcción sean arrojados al mar y riberas de ríos sin tratamiento previo (OEFA, 2014).

En consecuencia, utilizar los RCD como agregado reciclado para sustituir total o parcialmente el agregado natural y producir concreto con agregado reciclado es una forma efectiva para compensar la escasez de agregados naturales, la disposición de los residuos de concreto y los problemas ambientales relacionados. En este sentido, la presente investigación pretende respaldar la toma de decisiones para la incorporación de normativa que regule el uso de agregado de concreto reciclado en el Perú.

1.2. Formulación del problema

El problema estudiado se puede sintetizar con la siguiente interrogante:

¿Cuál es la resistencia a compresión del concreto elaborado con agregado de concreto reciclado obtenido de los residuos de la demolición de una edificación para la elaboración de un concreto $f_c=250 \text{ kg/cm}^2$?

1.3. Hipótesis

El uso de agregado de concreto reciclado en la fabricación de un concreto $f_c=250 \text{ kg/cm}^2$ aumenta su resistencia a la compresión en un 20% en comparación al concreto de control.

1.4. Variables

1.4.1. Variable independiente

Agregados reciclados.

1.4.2. Variable dependiente

Resistencia mecánica a compresión del concreto endurecido.

La operacionalización de las variables es presentada a continuación en el cuadro 1.1:

Cuadro 1.1 Operacionalización de variables

Hipótesis	Definición conceptual de las variables	Definición operacional de las variables			Técnicas e instrumento de recolección de datos
		Variables	Dimensiones	Indicadores	
Uso de agregado de concreto reciclado de un nuevo concreto aumenta su resistencia a compresión en 20%.	Los agregados reciclados obtenidos de la demolición de una edificación.	Agregados reciclados.	Variable independiente		Técnicas: Observación directa. Instrumentos: Registros y formatos de recopilación de datos.
			Granulometría	Husos granulométricos	
			Densidad promedio de partículas	Densidad de agregados de peso normal	
			Densidad de masa y vacíos		
			Resistencia a la abrasión	Pérdida < 50%	
			Material más fino < 75µm	Agregado fino < 5%	
	Contenido de humedad	-			
	Resistencia mecánica a compresión adquirida por el concreto elaborado con agregados natural y reciclado.	Resistencia mecánica a compresión del concreto endurecido.	Variable dependiente		
			Concreto fresco		
			Temperatura	± 23 °C	
			Contenido de aire	-	
			Asentamiento	3" – 4"	
			Densidad	Densidad de concreto normal	
			Concreto endurecido		
Resistencia a la compresión			≥ 250 kg/cm ²		
Resistencia a flexión	10% - 20% de \bar{X}				

1.5. Justificación de la investigación

A pesar que la utilización del agregado de concreto reciclado (ACR) es conocida a nivel mundial, el Perú carece de normativa que regule e incentive el uso de ACR en la elaboración de concreto, por lo que es necesario realizar más investigaciones que permitan conocer el comportamiento, desempeño y resistencia del concreto utilizando agregados reciclados. Además, la utilización de agregado producto de la demolición de edificaciones en nuevos concretos se justifica plenamente dada la necesidad por encontrar nuevas fuentes de materia prima y disminuir las cantidades significativas de RCD.

La presente investigación está dentro de los lineamientos del desarrollo sostenible (Sachs, 2015) y los principios establecidos en la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos (D.L. N° 1278, 2016) que estimulan la reducción del uso intensivo de los materiales y promueven la investigación y experimentación científica con residuos para maximizar su valorización.

1.6. Delimitación de la investigación

El presente estudio explora el uso de ACR producto de la demolición de una edificación ubicada en la urbanización Hurtado Miller del distrito de Baños del Inca para la elaboración de un concreto $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$ al reemplazar los agregados naturales por agregados reciclados en 20%, 30%, 40%, 50% y 100%.

Esta investigación abarca la evaluación de las propiedades físico-mecánicas de los agregados, las propiedades del concreto fresco y la resistencia a compresión de 99 especímenes cilíndricos del concreto endurecido a los 7, 14 y 28 días, de acuerdo a lo señalado en el cuadro 1.2. Asimismo, la investigación incluye la evaluación de la resistencia a flexión de 12 especímenes prismáticos endurecidos a los 28 días. Seis de los cuales fueron elaborados con el diseño de mezcla del concreto con ACR que presenta la mejor resistencia a compresión a los 28 días y seis, con el diseño de mezcla del concreto de control.

La investigación cubre la comparación de los módulos de elasticidad encontrados en campo con los valores calculados teóricamente y correlaciona los módulos de rotura (M_r) de los especímenes prismáticos con las resistencias a compresión de los especímenes cilíndricos endurecidos a los 28 días. Finalmente, la investigación incluye una evaluación económica del experimento.

Cuadro 1.2 Testigos cilíndricos y prismáticos probados en laboratorio

Ensayo	Norma	Rotura (d)	PR de AGR y AFR						Subtotal	Total
			0	20	30	40	50	100		
Resistencia a la compresión	Prueba	7	3	0	0	0	0	0	3	99
	NTP 339.034	7	6	6	6	6	6	0	30	
		14	6	6	6	6	6	0	30	
Estudio		28	6	6	6	6	6	6	36	
Resistencia a la flexión	NTP 339.079	28	6	6 (concreto con el mejor resultado a compresión)				12	12	
Total			30	24	18	18	18	6	111	111

1.7. Limitaciones

La investigación se limita a evaluar el concreto solamente por resistencia y no considera la evaluación de los agregados ni del concreto por durabilidad en condiciones de exposición ante procesos de congelación y deshielo, humedecimiento y secado, agentes químicos (especialmente cloruros y sulfatos) y aditivos descongelantes.

1.8. Objetivos

1.8.1. Objetivo general

- Realizar el estudio tecnológico del concreto $f'c=250$ kg/cm² elaborado con agregados reciclados (ACR) usados en edificaciones.

1.8.2. Objetivos específicos

- Determinar y comparar las propiedades físico-mecánicas de los agregados naturales y agregados de concreto reciclado.
- Diseñar la mezcla del concreto de control $f'c=250$ kg/cm² y la mezcla del concreto con ACR al reemplazar los agregados naturales al 20%, 30% 40%, 50% y 100% mediante el método del módulo de finura de la combinación de agregados.
- Comparar y analizar los resultados de los ensayos de densidad y contenido de aire del concreto fresco y resistencia a compresión y flexión del concreto endurecido.

1.9. Descripción del contenido de los capítulos

El Capítulo I presenta una breve introducción de la investigación, el planteamiento y formulación del problema, la hipótesis, los objetivos y la justificación.

El Capítulo II cubre los antecedentes teóricos donde se resumen investigaciones a nivel internacional, nacional y local; y las bases teóricas, donde se describen los fundamentos científicos en los que la presente investigación fue establecida, analizando las teorías relacionadas con el uso de agregado reciclado para la elaboración de un nuevo concreto. Finalmente, se describen los términos básicos utilizados en el presente estudio.

El Capítulo III presenta la ubicación geográfica donde se realizó la investigación, el diseño de la investigación y la metodología utilizada.

El Capítulo IV presenta y evalúa los resultados de las propiedades físico-mecánicas de los agregados naturales y reciclados, compara los resultados de los ensayos del concreto fresco y endurecido con ACR con los resultados del concreto de control.

Finalmente, el Capítulo V analiza las conclusiones y describe las líneas futuras de este trabajo.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes teóricos

2.1.1. Antecedentes internacionales

Zhou & Chen (2017): *Mechanical properties of recycled concrete made with different types of coarse aggregate* – 2016. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, China. La investigación llegó a las siguientes conclusiones:

1. En comparación con el agregado grueso de roca triturada (CRA) y el agregado grueso de cantos rodados (PA), ambos agregados naturales (NCA); el agregado grueso de concreto reciclado (RCRA) y el agregado de residuos de roca triturada (RPA), ambos agregados reciclados (RCA), tienen un contenido de absorción mayor, una densidad aparente y densidad de masa menores debido al mortero adherido del CRA.
2. Los procesos de falla a compresión del concreto con agregado reciclado en los diferentes porcentajes de reemplazo son similares. Al final del estado de falla, las fracturas principalmente existen en la interfase entre el mortero y el agregado. El proceso de falla del RCRC es más rápido que el del RPC.
3. Las resistencias a compresión y flexión del concreto con agregado reciclado exceden la resistencia del concreto convencional. Todas ellas tienen una tendencia a aumentar el porcentaje de reemplazo (cada 10%) debido a la absorción más alta del RCA que mejora la resistencia de la unión entre un agregado y el cemento. El concreto con RPA tiene una resistencia a la compresión relativa más alta que la del concreto con RCRA.
4. El módulo de elasticidad del concreto con RCA disminuye al aumentar el porcentaje de reemplazo, generalmente debido a la rigidez y densidad de masa menores del RCA.
5. La expresión teórica para las curvas esfuerzo-deformación para el concreto con agregado natural fueron utilizadas para los concretos con agregado reciclado, las cuales son coincidentes a las curvas experimentales.

Mjelde (2013): *Evaluation of recycled concrete for use as aggregate in new concrete pavements* – 2013. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Washington State University, Pullman, Estados Unidos de América. La investigación llegó a las siguientes conclusiones:

1. El material fino adherido al agregado grueso de concreto reciclado (ACR) obtenido de la demolición de pavimentos en el Estado de Washington influye significativamente al aumentar el valor de degradación. Además, la degradación fue esencialmente constante para el agregado combinado conteniendo diferentes porcentajes de ACR procesado.
2. Al incorporar ACR en la mezcla de concreto, la trabajabilidad del concreto fresco disminuye. Sin embargo, al sustituir cenizas volantes, la trabajabilidad del concreto fresco aumenta y puede utilizarse para contrarrestar la reducción del asentamiento causada por la adición del ACR.
3. Al sustituir un porcentaje más alto de ACR resulta en una densidad del concreto fresco más baja. Asimismo, un contenido de aire más alto se relaciona con una densidad del concreto más baja.
4. El PR de ACR no influye significativamente en la resistencia a compresión, y concretos hechos incorporando cantidades de ACR hasta del 45% del PR por agregado grueso natural exceden la resistencia mínima a los 28 días de 4,000 psi establecida por WSDOT. Una relación a/c más baja y un contenido de aire más bajo se relacionan con una resistencia a compresión a los 28 días más alta.

Vanegas Cabrera & Robles Castellanos, 2008: *Estudio experimental de las propiedades mecánicas del concreto reciclado para su uso en edificaciones convencionales* – 2008. Facultad de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. La investigación llegó a las siguientes conclusiones:

1. La trabajabilidad del concreto está afectada por el tipo de agregado y sus características (humedad y absorción). Al aumentar el contenido de agregado reciclado, disminuye la trabajabilidad de la mezcla.
2. Las mezclas con agregado reciclado tuvieron una menor resistencia a la compresión que la mezcla de concreto de control, probablemente debido a las texturas diferentes de los agregados.

3. Las mezclas con mayor PR de agregado reciclado tuvieron una mayor resistencia a flexión con respecto a la mezcla de control, mientras que la mezcla con 50 por ciento logró una resistencia semejante a la del concreto de control.
4. Los valores de módulo de elasticidad disminuyen al emplear agregado reciclado y son menores a los valores de las ecuaciones planteadas en la Norma sismo resistente $E=3900(f'_c)^{0.5}$ (MPa). A los 28 días de endurecimiento, las muestras no curadas lograron valores mayores que los del concreto de control.
5. Respecto a la correlación entre el módulo de rotura y la resistencia a compresión del concreto, no existe un valor único de la constante k, los valores oscilan entre 2.06 y 2.64.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Jordan Saldaña & Viera Caballero, 2014: *Estudio de la resistencia del concreto, utilizando como agregado el concreto reciclado de obra* – 2014. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Santa, Chimbote. La investigación llegó a las siguientes conclusiones:

1. La variación de la resistencia a compresión del concreto está en función del ACR. Al aumentar el ACR en la mezcla de concreto en un 25%, la resistencia a la compresión aumenta; sin embargo, los gastos operativos en la producción del mismo son más elevados en comparación con la utilización del 50% de reemplazo debido a que se utiliza una mayor cantidad de agregado grueso natural.
2. El contenido óptimo de agregado reciclado en las mezclas de concreto es del 50% debido a que se utiliza una menor cantidad de agregado grueso natural y que su resistencia a la compresión aumenta de una forma homogénea y uniforme.
3. Al reemplazar el agregado grueso al 100%, la resistencia a la compresión es irregular por lo que se recomienda su uso en construcciones de elementos no estructurales.

2.1.3. Antecedentes locales

Alvarez Torres, 2014: *Influencia en la resistencia del concreto al utilizar concreto reciclado como agregado grueso* – 2014. Facultad de Ingeniería, Universidad Privada del Norte, Cajamarca. La investigación llegó a las siguientes conclusiones:

1. Al reemplazar el total del agregado natural por concreto reciclado, la resistencia a compresión del concreto no incrementa.
2. El uso de concreto reciclado es viable como agregado grueso en la producción de concretos de resistencias de diseño $f'c = 175 \text{ kg/cm}^2$ y $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ al reemplazar el 25% del agregado grueso natural por concreto reciclado debido a que se alcanzaron resistencias de 175.09 kg/cm^2 y 210.76 kg/cm^2 .
3. Para los casos reemplazando el 50%, 75% y 100% del agregado grueso natural por concreto reciclado, los especímenes no alcanzan la resistencia de diseño para $f'c = 175 \text{ kg/cm}^2$ y $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Concreto

El concreto es un material de construcción heterogéneo compuesto principalmente por cemento, agua, y agregados fino y grueso, además de un pequeño volumen de aire (atrapado y/o incorporado) (Rivva Lopez, Concreto: Diseño de Mezcla, 2014). El agregado está definido como el conjunto de partículas inorgánicas de origen natural o artificial que pueden ser tratados o elaborados, cuyas dimensiones están comprendidas entre los límites fijados en la Norma NTP 400.011, 2008. El agregado corresponde a la fase discontinua del concreto y ocupa entre el 59% y el 76% del volumen de la mezcla. Por su peso puede clasificarse en normal, liviano y pesado. Por su limpieza en sucio y limpio y por su granulometría en agregado fino, grueso, o integral, conocido también como hormigón (Rivva Lopez, Concreto: Materiales para el concreto, 2014).

2.2.2. Agregados

Las características físicas, químicas y mecánicas de los agregados tienen un papel determinante en las propiedades y comportamiento del concreto sobre la trabajabilidad y consistencia en su estado fresco, así como sobre la durabilidad, resistencia, propiedades térmicas, cambios de volumen y densidad del concreto endurecido.

El agregado debe estar constituido por partículas limpias de una estructura con partículas resistentes y durables y una granulometría adecuada, preferentemente con perfil angular y textura rugosa. Además, el agregado debe ser resistente a la abrasión e inalterable en volumen, capaz de resistir cambios físicos o químicos que originen

rajaduras, hinchazón o ablandamiento del concreto. Por otro lado, los agregados finos y gruesos deben ser procesados como materiales independientes garantizándose uniformidad y una mínima pérdida de finos ni segregación importante (Rivva Lopez, 2014).

2.2.2.1. Granulometría

La combinación de los agregados debe permitir la mejor capacidad de acomodamiento y compactación de las partículas para obtener la máxima densidad del concreto con una adecuada trabajabilidad en función de las condiciones de colocación del concreto (Rivva Lopez, Concreto: Materiales para el concreto, 2014).

La Norma NTP 400.037, 2014, establece que el agregado fino consiste en arena natural, arena manufacturada o una combinación de ellas y debe cumplir con los requisitos granulométricos mostrados en la tabla 2.1. Además, recomienda que el agregado fino tenga un módulo de fineza entre 2.3 y 3.1.

Tabla 2.1 Granulometría del agregado fino

Tamiz	Porcentaje que pasa
9,5 mm (3/8 pulg)	100
4,75 mm (No. 4)	95 a 100
2,36 mm (No. 8)	80 a 100
1,18 mm (No. 16)	50 a 85
600 µm (No. 30)	25 a 60
300 µm (No. 50)	5 a 30
150 µm (No. 100)	0 a 10

Fuente: NTP 400.037, 2014.

Por otro lado, el agregado grueso debe consistir en grava, piedra chancada, concreto reciclado, o la combinación de ellos. Por otro lado, de utilizar agregado grueso reciclado, se recomienda precauciones adicionales, sobre todo en zonas de congelación y deshielo u otros agentes agresivos como sulfatos o cloruros.

El agregado grueso deberá cumplir con los requisitos de la tabla 2.3. La Norma resalta para ambos agregados que se permitirá el uso de agregados que no cumplan con las gradaciones especificadas siempre y cuando existan estudios que aseguren que los materiales producirán concreto de la resistencia y calidad requerida.

Tabla 2.2 Granulometría del agregado grueso

Huso	TMN	Porcentaje que pasa por los tamices normalizados													
		100 mm (4")	90 mm (3 ½")	75 mm (3")	63 mm (2 ½")	50 mm (2")	37.5 mm (1 ½")	25 mm (1")	19 mm (¾")	12.5 mm (½")	9.5 mm (3/8")	4.75 mm (N° 4)	2.36 mm (N° 8)	1.18mm (N° 16)	300 µm (N° 50)
1	3 ½" a 1 ½"	100	90 a 100	-	25 a 60	-	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-	-	-	-
2	2 ½" a 1 ½"	-	-	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-	-	-	-
3	2" a 1"	-	-	-	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-	-	-
357	2" a N° 4	-	-	-	100	90 a 100	-	35 a 70	-	10 a 30	-	0 a 5	-	-	-
4	1 ½" a ¾"	-	-	-	-	100	90 a 100	20 a 55	0 a 5	-	0 a 5	-	-	-	-
467	1 ½" a N° 4	-	-	-	-	100	90 a 100	-	35 a 70	-	10 a 30	0 a 5	-	-	-
5	1" a ½"	-	-	-	-	-	100	90 a 100	20 a 55	0 a 10	0 a 5	-	-	-	-
56	1" a 3/8"	-	-	-	-	-	100	90 a 100	40 a 85	10 a 40	0 a 15	0 a 5	-	-	-
57	1" a N° 4	-	-	-	-	-	100	95 a 100	-	25 a 60	-	0 a 10	0 a 5	-	-
6	¾" a 3/8"	-	-	-	-	-	-	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	0 a 5	-	-	-
67	¾" a N° 4	-	-	-	-	-	-	100	90 a 100	-	20 a 55	0 a 10	0 a 5	-	-
7	½" a N° 4	-	-	-	-	-	-	-	100	90 a 100	40 a 70	0 a 15	0 a 5	-	-
8	3/8" a N° 8	-	-	-	-	-	-	-	-	100	85 a 100	10 a 30	0 a 10	0 a 5	-
89	½" a 3/8"	-	-	-	-	-	-	-	-	100	90 a 100	20 a 55	5 a 30	0 a 10	0 a 5
9	N° 4 a N° 16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	85 a 100	10 a 40	0 a 10	0 a 5

Fuente: NTP 400.037, 2014.

2.2.2.2. Perfil y textura

La forma de las partículas del agregado juega un papel muy importante en la fabricación del concreto. Esto se debe a que la capacidad de compactación de una mezcla no solo depende de la granulometría sino también del grado de acomodamiento de las partículas. De acuerdo a su perfil, las partículas del agregado pueden ser: redondeados, irregulares, laminadas, angulares, semiangulares o semiredondeadas, elongadas, y laminadas (Rivva Lopez, Concreto: Materiales para el concreto, 2014).

Las partículas más adecuadas son: las partículas redondeadas son trabajadas por el agua (grava de río); las partículas irregulares, gravas naturales irregulares o parcialmente perfiladas por desgaste (gravas de cantera de aluvión); y las partículas angulares formados por la intersección de caras rugosas. La textura de los agregados puede afectar significativamente las propiedades del concreto, especialmente la adherencia entre las partículas del agregado y la pasta del cemento.

2.2.2.3. Porosidad

La importancia de los espacios porosos en los agregados se debe a su influencia sobre otras propiedades físicas y químicas de los mismos. De acuerdo con Rivva Lopez, 2014, los agregados que tienen un mayor volumen total de poros (especialmente si los poros individuales son pequeños) son más propensos a sufrir ataques químicos debido a su mayor superficie específica que aquellos con un menor volumen de poros. La porosidad es inversamente proporcional a la densidad relativa de masa, la cual afecta la resistencia de carga de los materiales más porosos al tener una menor área neta de sólidos y a la resistencia a la abrasión del agregado. La rugosidad y las características de los poros de la zona superficial afectan la textura superficial y la calidad de la adherencia con la pasta (Rivva Lopez, Concreto: Materiales para el concreto, 2014).

Las características de porosidad del agregado influyen considerablemente en la durabilidad del concreto ante un fenómeno de congelación y deshielo. Los daños en las estructuras ocurren en condiciones críticas de contenido de agua y falta de drenaje. Las características de los poros determinan la magnitud y velocidad de absorción del agregado, así como la facilidad de drenaje. Sin embargo, debido a la dificultad para obtener información completa sobre la estructura porosa de un agregado, no se ha podido establecer una correlación entre la durabilidad del concreto y las características de porosidad. En su lugar, se ha correlacionado la durabilidad con una medición simple de

la porosidad o con alguna propiedad física que depende de la porosidad. Entre ellas se encuentra la relación de vacíos de poros menores a 5 mm, absorción, densidad relativa (peso específico) y grado de saturación (Rivva Lopez, Concreto: Materiales para el concreto, 2014).

2.2.2.3.1. Absorción

La absorción se obtiene después de sumergir el agregado seco durante un período de tiempo definido. El cálculo de la absorción tanto para el agregado grueso como para el fino está determinado por las Normas NTP 400.021, 2013 y NTP 400.022, respectivamente.

- Para el caso del agregado grueso, la absorción se determina de la siguiente manera:

$$Absorción_g, \% = [(B - A)/A] \times 100 \quad (2.1)$$

Donde:

A: masa de la muestra secada al horno en aire, g.

B: masa de la muestra de ensayo de superficie saturada seca en aire, g.

- Para el caso del agregado fino, la absorción se determina de la siguiente manera:

$$Absorción_f, \% = [(S - A)/A] \times 100 \quad (2.2)$$

Donde:

A: masa de la muestra secada al horno, g.

S: masa de muestra saturada superficialmente seca, g.

La tabla 2.3 establece las desviaciones estándares establecidas por Norma para los resultados de absorción de los agregados gruesos y finos.

Tabla 2.3 Precisión de los resultados de absorción de los agregados grueso y fino

	Agregado grueso		Agregado fino	
	Desviación Estándar	Rango aceptable de dos resultados	Desviación Estándar	Rango aceptable de dos resultados
Precisión de un solo operador:				
Absorción, %	0.088	0.25	0.11	0.31

Fuente: NTP 400.021, 2013 y NTP 400.022.

2.2.2.4. Sustancias perjudiciales

La cantidad de material fino que tiene un agregado puede ser perjudicial para la resistencia del concreto al impedir los enlaces entre la pasta y las partículas del agregado. En este grupo de material, partículas con diámetros inferiores a 75 micras, se incluyen arcillas, limos y polvos procedentes de la trituración. Además de la disminución de la adherencia entre la pasta y el agregado, los finos pueden generar esfuerzos de tensión dentro de la masa de concreto y por su alta finura y alta superficie específica, se requiere un aumento de agua y cemento para una relación A/C determinada (Osorio, 2013).

La Norma NTP 400.018, 2013 establece el procedimiento para determinar la cantidad de material más fino que pasa el tamiz de 75 μm , el cual es calculado de la siguiente manera:

$$A, \% = [(P_1 - P_2)/P_1] \times 100 \quad (2.3)$$

Donde:

A: Porcentaje de material más fino que el tamiz N° 200 por vía húmeda.

P₁: Masa seca de la muestra original, g.

P₂: Masa seca de la muestra luego del lavado, g.

Los resultados son aceptados de acuerdo a la precisión indicada en la Tabla 2.4 establecida por la Norma respectiva.

Tabla 2.4 Precisión de los resultados de material más fino que 75 μm (N° 200) de los agregados grueso y fino

	Agregado grueso		Agregado fino	
	Desviación Estándar	Rango aceptable de dos resultados	Desviación Estándar	Rango aceptable de dos resultados
Precisión de un solo operador:				
Material más fino que 75 μm	0.10	0.28	0.15	0.43

Fuente: NTP 400.018, 2013.

Por otro lado, la Norma NTP 400.037, 2014 establece el máximo contenido de sustancias deletéreas en la elaboración de concreto (Ver tabla 2.5). Se permitirá el uso de

agregado grueso que no cumpla con los límites establecidos en la tabla 2.5 cuando existan estudios que aseguren que el material producirá concreto de la resistencia requerida.

Tabla 2.5 Límites para sustancias deletéreas en los agregados fino y grueso

Ensayo	Máximo porcentaje de la muestra total, %	
	Agregado fino	Agregado grueso
Terrones de arcilla y partículas deleznable	3.0	5.0
Material más fino que el tamiz N° 200:		1.0**
- Concreto sujeto a abrasión:	3.0*	
- Otros concretos:	5.0*	
Carbón y lignito:		
- Cuando la apariencia de la superficie del concreto es importante:	0.5	0.5
- Otros concretos:	1.0	1.0

Fuente: NTP 400.037, 2014.

* *Estos valores pueden aumentarse a 5% y 7% respectivamente, siempre que estén libres de arcillas o limos.*

** *Este porcentaje podrá ser aumentado a 1.5 % si el material está esencialmente libre de limos y arcillas.*

2.2.2.5. Densidad promedio de partículas (no incluye orificios entre partículas), densidad relativa (peso específico)

Las Normas NTP 400.021, 2013 y NTP 400.022, 2013 establecen los procedimientos para determinar la densidad promedio de partículas (sin incluir los orificios entre las partículas), la densidad relativa (anteriormente conocida como peso específico o gravedad específica) y la absorción del agregado grueso y del agregado fino, respectivamente. Dependiendo del procedimiento, la densidad promedio de partículas (en kg/m³) y la densidad relativa (adimensional) se expresan como secado al horno (SH), saturada superficialmente seca (SSS) o densidad aparente.

La densidad promedio de partículas se refiere a la densidad de la porción esencialmente sólida de un gran número de partículas de agregado y proporciona un valor promedio que representa la muestra. La densidad relativa es la característica usada para el cálculo del volumen ocupado por el agregado en mezclas de concreto de cemento Portland. La densidad relativa (SSS) se utiliza si la absorción del agregado se ha cumplido. Por el contrario, la densidad o densidad relativa (SH) se utiliza para el cálculo cuando el agregado está seco o se supone que está seco. La densidad aparente y la densidad relativa aparente (gravedad específica aparente) se refieren al producto sólido

que componen las partículas constituyentes sin incluir el espacio de los poros dentro de las partículas accesibles al agua.

El cálculo de las densidades relativas y densidades de partículas del agregado grueso se realiza de la siguiente manera:

- **Densidad relativa_g (SH):** El cálculo de la densidad relativa (SH) se determinó en base al agregado secado al horno de la siguiente manera:

$$\text{Densidad relativa (SH)} = A / (B - C) \quad (2.4)$$

- **Densidad relativa_g (SSS):** El cálculo de la densidad relativa (SSS) se determinó en base al agregado saturado de superficie seca de la siguiente manera:

$$\text{Densidad relativa (SSS)} = B / (B - C) \quad (2.5)$$

- **Densidad relativa aparente_g:** El cálculo de la densidad relativa aparente se determinó en base al agregado secado al horno de la siguiente manera:

$$\text{Densidad relativa aparente} = A / (A - C) \quad (2.6)$$

- **Densidad_g (SH):** El cálculo de la densidad (SH) se determinó en base al agregado secado al horno de la siguiente manera:

$$\text{Densidad (SH), kg/m}^3 = 999.1 \cdot A / (B - C) \quad (2.7)$$

- **Densidad_g (SSS):** El cálculo de la densidad (SSS) se determinó en base al agregado de superficie seca saturado de la siguiente manera:

$$\text{Densidad (SSS), kg/m}^3 = 999.1 \cdot B / (B - C) \quad (2.8)$$

- **Densidad aparente_g:** El cálculo de la densidad relativa aparente se determinó en base al agregado secado al horno de la siguiente manera:

$$\text{Densidad aparente, kg/m}^3 = 999.1 \cdot A / (A - C) \quad (2.9)$$

Donde:

A: masa de la muestra secada al horno en aire, g.

B: masa de la muestra de ensayo de superficie saturada seca en aire, g.

C: masa aparente de la muestra de ensayo saturada en agua, g.

991.1: Densidad del agua a una temperatura de 15 °C calculada utilizando la tabla 2.8.

La tabla 2.6 establece la precisión y desviación estándar establecida por Norma para la aceptación de los resultados de densidad y densidad relativa del agregado grueso.

Tabla 2.6 Precisión de los resultados de densidad y densidad relativa del agregado grueso

	Desviación Estándar	Rango aceptable de dos resultados
Precisión de un solo operador:		
Densidad (SH), kg/m ³	9	25
Densidad (SSS), kg/m ³	7	20
Densidad aparente, kg/m ³	7	20
Densidad relativa (SH)	0.009	0.025
Densidad relativa (SSS)	0.007	0.020
Densidad relativa aparente	0.007	0.020

Fuente: NTP 400.021, 2013 (Tabla 1).

Por otro lado, el cálculo de las densidades relativas y densidades de partículas del agregado fino se realiza de la siguiente manera:

- **Densidad relativa (SH):** El cálculo de la densidad relativa (SH) se determinó en base al agregado secado al horno de la siguiente manera:

$$\text{Densidad relativa (SH)} = A / (B + S - C) \quad (2.10)$$

- **Densidad relativa (SSS):** El cálculo de la densidad relativa (SSS) se determinó en base al agregado saturado de superficie seca de la siguiente manera:

$$\text{Densidad relativa (SSS)} = S / (B + S - C) \quad (2.11)$$

- **Densidad relativa aparente:** El cálculo de la densidad relativa aparente se determinó en base al agregado secado al horno de la siguiente manera:

$$\text{Densidad relativa aparente} = A / (B + A - C) \quad (2.12)$$

- **Densidad (SH):** El cálculo de la densidad (SH) se determinó en base al agregado secado al horno de la siguiente manera:

$$\text{Densidad (SH), kg/m}^3 = 999.1 \cdot A / (B + S - C) \quad (2.13)$$

- **Densidad_r (SSS):** El cálculo de la densidad (SSS) se determinó en base al agregado de superficie seca saturado de la siguiente manera:

$$\text{Densidad (SSS), kg/m}^3 = 999.1 \cdot S / (B + S - C) \quad (2.14)$$

- **Densidad aparente:** El cálculo de la densidad relativa aparente se determinó en base al agregado secado al horno de la siguiente manera:

$$\text{Densidad aparente, kg/m}^3 = 999.1 \cdot A / (B + A - C) \quad (2.15)$$

Donde:

A: masa de la muestra secada al horno, g.

B: masa de la fiola llenada de agua hasta la marca de calibración, g.

C: masa de la fiola llena de muestra y agua hasta la marca de calibración, g.

S: masa de muestra saturada superficialmente seca, g.

991.1: Densidad del agua a una temperatura de 15 °C calculada utilizando la tabla 2.8.

La tabla 2.7 establece la precisión y desviación estándar establecida por Norma para la aceptación de los resultados de densidad y densidad relativa del agregado fino.

Tabla 2.7 Precisión de los resultados de densidad y densidad relativa del agregado fino

	Desviación Estándar	Rango aceptable de dos resultados
Precisión de un solo operador:		
Densidad (SH), kg/m ³	11	13
Densidad (SSS), kg/m ³	9.5	27
Densidad aparente, kg/m ³	9.5	27
Densidad relativa (SH)	0.011	0.032
Densidad relativa (SSS)	0.0095	0.027
Densidad relativa aparente	0.0095	0.027

Fuente: NTP 400.022, 2013 (Tabla 1).

2.2.2.6. Densidad de masa (peso unitario) y vacíos

La Norma NTP 400.017, 2016 establece el procedimiento para determinar la masa por unidad de volumen (peso unitario) y vacíos de los agregados en condición suelto y

compactado sobre una base seca para gregados que no excedan los 125 mm del TMN. El cálculo de la densidad del agua se realiza de acuerdo a la tabla 2.8.

Tabla 2.8 Densidad del agua

Temperatura, °C	Densidad del agua, kg/m ³
15.6	999.01
18.3	998.54
21.1	997.97
23.0	997.54
23.9	997.32
26.7	996.59
29.4	995.83

Fuente: NTP 400.017, 2016 (Tabla 3).

La densidad de masa fue calculada de la siguiente manera:

$$M = (G - T)/V \quad (2.16)$$

$$\text{ó } M = (G - T) \times F \quad (2.17)$$

Donde:

M: Densidad de masa del agregado, kg/m³.

G: Masa del recipiente y el agregado, kg.

T: Masa del recipiente, kg.

V: Volumen del recipiente, m³.

F: Factor F del recipiente, 1/m³.

Por otro lado, el contenido de vacíos del agregado fue calculado usando la densidad de masa como sigue:

$$\% \text{ Vacíos} = 100 \cdot \frac{[(S \cdot W) - M]}{(S \cdot W)} \quad (2.18)$$

Donde:

M: Densidad de masa del agregado, kg/m³.

S: Densidad relativa de masa (SH) de conformidad con los métodos descritos en los acápites 3.4.2.1.2 y 3.4.2.1.3, adimensional.

W: Densidad del agua a una temperatura de 15 °C calculada utilizando la tabla 3.4.

Además, el volumen del recipiente y el factor F fueron calculados como sigue:

$$V = (W - M)/D \quad (2.19)$$

$$F = D/(W - M) \quad (2.20)$$

Donde:

V: Volumen del recipiente, m³.

W: Masa del agua, placa de vidrio y recipiente, kg.

M: Masa de la placa de vidrio y recipiente, kg.

D: Densidad del agua a una temperatura de 15 °C calculada utilizando la tabla 3.4.

F: Factor para el recipiente, 1/m³.

La tabla 2.9 establece la precisión y desviación estándar establecida por Norma para la aceptación de los resultados de densidad de masa de los agregados grueso y fino.

Tabla 2.9 Precisión de los resultados de densidad de masa de los agregados grueso y fino

	Agregado grueso		Agregado fino	
	Desviación Estándar	Rango aceptable de dos resultados	Desviación Estándar	Rango aceptable de dos resultados
Precisión de un solo operador:				
Densidad de masa, kg/m ³	14	40	14	44

Fuente: NTP 400.017, 2016.

2.2.2.7. Intemperismo y abrasión

Dependiendo de la severidad de intemperismo, abrasión y otros factores de exposición, se designará la clase de agregado grueso a ser empleado para garantizar un comportamiento satisfactorio del concreto. Sin embargo, los límites excesivamente restrictivos, o en su defecto poco restrictivos, pueden resultar en costos innecesarios si el material requerido no se encuentra disponible localmente, o en un comportamiento insatisfactorio y deterioro prematuro del concreto. Rivva Lopez, 2014 recomienda que al

escoger el agregado grueso de concretos expuestos a condiciones de intemperismo, se debe consultar un mapa de isotermas o estudiar el comportamiento de estructuras similares construidas en la zona, los registros de precipitaciones de invierno, y ciclos de congelación y deshielo a fin de determinar la posible severidad del intemperismo.

En el caso de las pruebas de desgaste o abrasión, el ensayo más generalizado es el de Los Ángeles, el cual consiste en determinar la cantidad de material desgastado en una muestra de un agregado de granulometría especificada al ser impactada por esferas de acero en un tambor giratorio horizontal por un número determinado de vueltas. La cantidad de material fragmentado constituye un indicador de calidad. La pérdida del material del ensayo de abrasión e impacto en la máquina de Los Ángeles como un porcentaje de la masa original de la muestra de ensayo se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Porcentaje de pérdida, \%} = [(C - Y)/C] \times 100 \quad (2.21)$$

Donde:

C: Masa original de la muestra de ensayos, g.

Y: Masa final de la muestra de ensayo, g.

De acuerdo a la Norma NTP 400.037, 2014, la resistencia mecánica del agregado grueso utilizado en concretos de pavimentos y en estructuras de 280 kg/cm^2 o más deberá ser superior al 50% de la masa original de la muestra en el ensayo de abrasión de Los Ángeles. Además, los resultados serán aceptados al tener un coeficiente de variación máximo del 2% para un mismo operador y los resultados de dos ensayos efectuados por el mismo operador con muestras del mismo agregado grueso no deben diferir en más de 5.7 % de su promedio.

2.2.2.8. Contenido de humedad

La humedad evaporable incluye la humedad superficial y la contenida en los poros del agregado sin considerar el agua que se combina químicamente con los minerales de algunos agregados y que no es susceptible de evaporación. La Norma NTP 339.185, 2002 establece el procedimiento para el cálculo de la humedad total evaporable de los agregados.

El cálculo del contenido de humedad total evaporable se realizó de la siguiente manera:

$$W, \% = 100(M - D)/D \quad (2.22)$$

Donde:

W: Contenido de humedad total evaporable de la muestra, %.

M: Masa de la muestra húmeda original, g.

D: Masa de la muestra seca, g.

2.2.3. Agregados de concreto reciclado (ACR)

El agregado resulta del procesamiento de materiales inorgánicos utilizados previamente en la construcción. Los residuos de concreto de cemento con *clinker* Portland y agregados naturales, triturados, cribados y procesados en plantas de reciclado dan lugar al material secundario agregado de concreto reciclado (Arriaga Taffhurt, 2013). El material, de acuerdo a la norma holandesa, deberá contener un porcentaje mayor del 50% de concreto con una densidad seca superior a 2100 kg/m³ y no más del 50% de materiales pétreos reciclados de distinta naturaleza que el concreto.

De acuerdo a Arriaga Taffhurt (2013), el uso de las fracciones finas del agregado de concreto reciclado implica un aumento muy notable de la retracción por secado y de la fluencia debido a la mayor cantidad de agua que precisan en su dosificación. En general, los agregados de concreto reciclado de tamaño mayor o igual a 4 mm son potencialmente aptos para la fabricación de concreto. Si la sustitución de agregado grueso convencional es menor o igual al 20%, las propiedades mecánicas permanecen prácticamente constantes.

2.2.3.1. Fuentes de residuos y producción de ACR

Los agregados de concreto reciclado proceden de dos fuentes asociados a los residuos del propio proceso de construcción y a la demolición de estructuras existentes. El origen induce distintas características en el agregado fundamentalmente vinculadas al envejecimiento y grado de hidratación del mortero adherido, el cual siempre está presente, en mayor o menor medida, en el agregado procedente del concreto reciclado.

La demolición debe considerarse de forma que permita el máximo grado de reutilización de componentes y materiales. La demolición selectiva favorece el conocimiento del futuro agregado de concreto reciclado, permite una preselección según la calidad del concreto a demoler y, en definitiva, favorece la uniformidad de la calidad.

Sin embargo, su viabilidad está condicionada por factores tales como la accesibilidad, el tiempo disponible y costo global de la actuación. La demolición selectiva es más cara en comparación con los métodos tradicionales de demolición, por ello, la incidencia del costo de procesamiento puede ser muy importante respecto a la adopción de un sistema u otro.

Es importante eliminar impurezas y evitar que los escombros del concreto se mezclen con otros materiales no deseados (Mjelde, 2013).

2.2.3.2. Propiedades del ACR

Las propiedades del concreto hecho con ACR dependen de la calidad de sus agregados. Generalmente, se cree que si hay una menor cantidad de mortero rodeando el ACR, la calidad y efectividad del ACR aumenta. Se asume que el ACR tendrá propiedades similares al agregado virgen original utilizado en la fuente del material del ACR (Garber, et al., 2011 en Mjelde, 2013). El concreto final producido será de mejor calidad de tener una mejor fuente del ACR. Aún así, es posible producir nuevo concreto utilizando ACR eficientemente incluso cuando la fuente del ACR no es de la mejor calidad.

2.2.3.2.1. Densidad relativa

La densidad relativa del ACR es típicamente menor que la del agregado natural debido a la pasta de cemento adherida a los granos. Este mortero hace que el material sea menos denso debido a su estructura porosa y aire atrapado inicial (Anderson, Uhlmeier and Russel, 2009 en Mjelde, 2013). La densidad relativa del ACR es un parámetro importante porque al reemplazar el agregado natural con ACR puede resultar en un volumen totalmente diferente en la tanda de concreto. De no considerar la diferencia de las densidades relativas (por ejemplo, sustitución por peso), el rendimiento total del concreto será mayor que lo esperado. Esto puede resultar en diferentes proporciones agregado/cemento y a/c; sin embargo, de considerar la diferencia de densidades relativas entre agregados y de basar la sustitución del agregado en volumen, se obtendrán las proporciones de mezcla requeridas.

2.2.3.2.2. Granulometría

La granulometría del ACR varía según el proceso de trituración que se realice, pudiéndose seleccionar mediante pequeños ajustes en la apertura de las trituradoras. El porcentaje de agregado grueso que se obtiene puede variar entre 70% y 90% del agregado

total producido, el cual depende del tamaño máximo del agregado grueso de concreto reciclado producido y de la composición del concreto original (Mjelde, 2013).

2.2.3.2.3. Abrasión en la máquina de Los Ángeles

Típicamente, los agregados gruesos naturales presentan una pérdida por abrasión entre 15% y 30%. Basado en investigaciones anteriores, la pérdida por abrasión del ACR oscila entre 20% y 45% (Anderson, Uhlmeier and Russel, 2009 en Mjelde, 2013). El amplio rango de los valores depende de la calidad de los agregados y del concreto original, tamaño de partículas y el propio coeficiente de Los Ángeles del agregado original (Arriaga Taffhurt, 2013).

Una de las principales causas para un mayor desgaste del ACR es que el enlace del cemento y el agregado natural es más débil que la estructura interna del agregado grueso natural (Amorim, de Brito y Evangelista, 2012 en Mjelde, 2013). A pesar de este débil enlace, muchas de las muestras de ACR cumplen con los límites del ensayo de Los Ángeles y consecuentemente es aceptable su uso en estructuras de concreto nuevo.

2.2.3.2.4. Forma y textura superficial

La presencia del mortero que queda adherido a los agregados del concreto original provoca que la textura de los agregados de concreto reciclado sea más rugosa y porosa que la de los agregados naturales como consecuencia del proceso de trituración. Sin embargo, el coeficiente de forma del agregado de concreto reciclado es similar al que puede presentar el agregado natural (Arriaga Taffhurt, 2013).

2.2.3.2.5. Densidad y absorción

La densidad del agregado de concreto reciclado es inferior a la del agregado natural, debido a la pasta de cemento que queda adherida a los granos. La densidad del agregado de concreto reciclado suele oscilar entre 2100 y 2400 kg/m³, mientras que la densidad saturada con superficie seca varía entre 2300 y 2500 kg/m³, por lo que en todos los casos se pueden considerar estos agregados de densidad normal (no livianos: con una densidad cuando están sueltos y secos de 1120 kg/m³ o menos de acuerdo a ASTM C330/NTC 4045). La absorción es una de las propiedades físicas del agregado de concreto reciclado que presenta una mayor diferencia con respecto al agregado natural, debido a la elevada absorción de la pasta que queda adherida a él. Los principales aspectos que influyen tanto

en la densidad como en la absorción del agregado de concreto reciclado son: el tamaño de las partículas, la calidad del concreto original y las técnicas de procesado.

2.2.4. Concreto fresco

La trabajabilidad, contenido de aire, y densidad son las propiedades más importantes del concreto fresco. Investigaciones previas han demostrado que el ACR ha influenciado en cada una de estas propiedades (Mjelde, 2013).

2.2.4.1. Trabajabilidad

Las mezclas de concreto hechas con ACR son típicamente menos trabajables que aquellas con solamente agregados naturales. Esta capacidad de trabajabilidad reducida proviene de dos fuentes: (1) El ACR tiene una forma más angular que los agregados naturales aumentando la fricción entre agregados (Amorim, de Brito y Evangelista, 2012 en Mjelde, 2013). Esto debido a los procesos de trituración utilizados al producir el ACR. (2) La porción de mortero adherida del agregado tiene una absorción mayor. Esta absorción más alta puede reducir el agua efectiva de la mezcla, en consecuencia, hace la mezcla menos trabajable (Garber, et al. 2011 en Mjelde, 2013). La baja trabajabilidad de mezclas con ACR pueden ser mitigadas agregando más agua a la mezcla de diseño o incorporando aditivos reductores de agua.

2.2.4.2. Contenido de aire

Las mezclas de concreto que utilizan ACR tienden a tener contenidos de aire ligeramente más altos que las mezclas de concreto con solamente agregados naturales. Esto debido al aire atrapado en la porción de mortero adherida del ACR (Anderson, Uhlmeier y Russel, 2009 en Mjelde, 2013). En el intento de contrarrestar este problema, se recomienda retirar la mayor parte posible del mortero del ACR antes de incorporarlo a la mezcla de concreto.

2.2.4.3. Densidad

La densidad de mezclas de concreto utilizando ACR es típicamente menor que la de mezclas hechas con solamente agregados naturales. La porción de mortero del ACR tiene una estructura de aire atrapado menos densa que la roca a la que está adherida. Por lo tanto, a medida que se agrega más ACR a la mezcla, la densidad del concreto resultante será menor (Anderson, Uhlmeier y Russel, 2009 en Mjelde, 2013)

2.2.5. Concreto endurecido

El ACR influye en las siguientes en las siguientes propiedades de concreto endurecido: resistencia a compresión, módulo de rotura, coeficiente de expansión térmica, contracción por secado y durabilidad. Un estudio encontró que hasta una sustitución de ACR del 30% no tiene efectos negativos significantes en las propiedades de concreto endurecido (Limbachiya, Meddah y Ouchagour, 2012 en Mjelde, 2013).

2.2.5.1. Resistencia a compresión

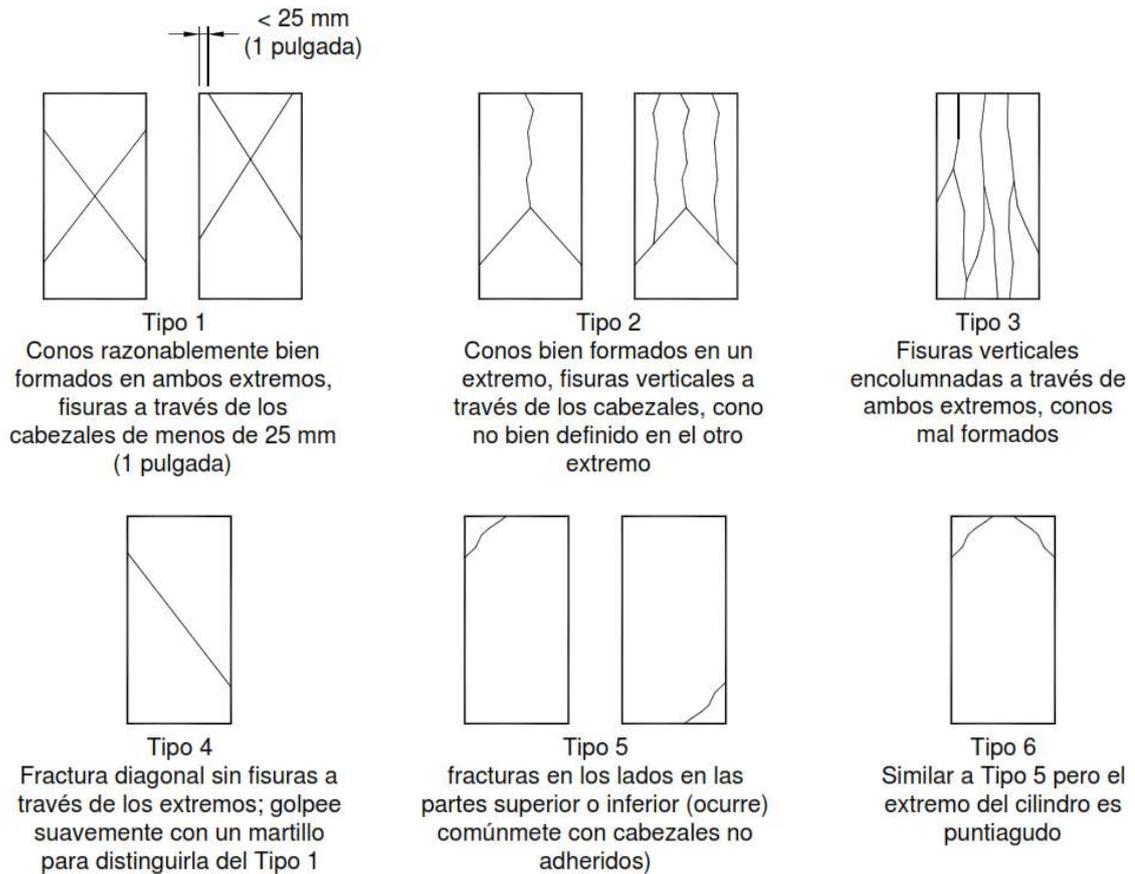
Conclusiones de estudios anteriores en los efectos del ACR en la resistencia a la compresión se reducen a dos grupos. Algunos de los investigadores concluyen que no hay diferencia alguna en resistencias a la compresión entre concretos con agregados naturales y ACR (Amorim, de Brito y Evangelista, 2012, en Mjelde, 2013). Se especula que la zona de transición interfacial más fuerte entre los agregados más angulares y la nueva pasta de cemento explica la resistencia a la compresión se mantenga. Sin embargo, otros estudios indican que la resistencia a la compresión de concretos que incorporan ACR es típicamente menor que la de aquellos hechos agregado natural (Anderson, Uhlmeier y Russel, 2009 en Mjelde, 2013). Se han sugerido varios factores que contribuyen con la reducción en la resistencia. Concretos de ACR típicamente requieren una relación a/c mayor para obtener la trabajabilidad necesaria, afectando la resistencia a compresión del concreto. Además, concretos con ACR usualmente tienen un contenido de aire mayor, disminuyendo así la resistencia a compresión. Es importante, además, resaltar que el ensayo a compresión debe realizarse hasta que el espécimen de concreto muestre un patrón de fractura bien definido de acuerdo con la figura 2.1 (Ver Norma NTP 339.034, 2008). Asimismo, el tiempo permisible de tolerancia considerado para ensayar los testigo de concreto se muestra en la tabla 2.10 para varias edades.

Tabla 2.10 Tolerancia de rotura de especímenes de concreto

Edad de ensayo	Tolerancia permisible
24 h	± 0.5 h
3 d	± 2 h
7 d	± 6 h
28 d	± 20 h
90 d	± 48 h

Fuente: NTP 339.034, 2013 (Pág. 11).

Figura 2.1 Esquema de los patrones tipos de fracturas



Fuente: NTP 339.034, 2008.

El cálculo de la resistencia a compresión se realizó utilizando la siguiente ecuación:

$$X_i = P/A_{prom} \quad (2.23)$$

Donde:

X_i : Resistencia a la compresión de un espécimen, kg/cm^2 .

P : Carga máxima alcanzada por el espécimen durante el ensayo, kg .

A_{prom} : Área promedio de la sección transversal con aproximación a $1 \text{ kg}/\text{cm}^2$, cm^2 .

De acuerdo a la Norma NTP 339.034, 2008, el coeficiente de variación de una misma muestra de cilindros de concreto de $150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ y ensayados a una misma edad para resistencias a compresión entre 15 MPa y 55 MPa ($150 \text{ kg}/\text{cm}^2$ y $560 \text{ kg}/\text{cm}^2$) es de 2.4% en condiciones de laboratorio. Sin embargo, Rivva Lopez recomienda un coeficiente de variación de 5% para ensayos de laboratorio.

2.2.5.2. Módulo de elasticidad (E_c)

El módulo de elasticidad E_c está definido como la pendiente de la línea dibujada desde una resistencia de cero a una resistencia a compresión de $0.45f'_c$. El módulo de elasticidad para el concreto es susceptible al módulo de elasticidad del agregado y las proporciones de mezcla del concreto. Los valores del módulo de elasticidad medidos pueden variar de 80% a 120% de los valores calculados (ACI Committee 318M, 2014). El estándar ASTM C 469, 1994 provee un método para determinar el módulo de elasticidad para el concreto en compresión.

De acuerdo al Comité 318M del ACI, 2014, E_c para concretos de densidades entre 1440 y 2560 kg/m³ debe calcularse de la siguiente manera:

$$E_{c1} = D_c^{1.5} 0.14 \sqrt{f'_c} \text{ (en kg/cm}^2\text{)} \quad (2.24)$$

En cambio, para concretos de peso normal, E_c se calcula de la siguiente manera:

$$E_c = 15100 \sqrt{f'_c} \text{ (en kg/cm}^2\text{)} \quad (2.25)$$

Por otro lado, el método descrito en el estándar ASTM C 469 – 94 cubre el cálculo de: el módulo cuerda (módulo de elasticidad Young). La deformación unitaria es definida con la siguiente ecuación:

$$\epsilon = \Delta l / l \quad (2.26)$$

Donde:

ϵ : Deformación unitaria.

Δl : Variación de longitud mm.

l : longitud del espécimen, mm.

El módulo de elasticidad E_c es calculado de la siguiente manera:

$$E_c = (S_2 - S_1) / (\epsilon_2 - 0.000050) \quad (2.27)$$

Donde:

E_c : Módulo cuerda de elasticidad, kg/cm².

S_2 : Resistencia equivalente al 40% de la carga última, kg/cm².

S_1 : Resistencia equivalente a la deformación unitaria ϵ_1 de 50 millonésimas, kg/cm^2 .

ϵ_2 : Deformación unitaria producida por la resistencia S_2 .

2.2.5.3. Módulo de rotura (M_r)

El módulo de rotura se define como la resistencia a la flexión del concreto al estar sometida a una carga de flexión. Similar a la resistencia a la compresión, el módulo de ruptura del concreto incorporando ACR es menor que el de aquellos hechos con agregado natural. Un estudio encontró que la resistencia a la flexión del concreto con ACR puede ser hasta un 8% menor que el concreto con agregado natural (Anderson, Uhlmeier y Russel, 2009 en Mjelde, 2013). Esta reducción de resistencia puede ser el resultado de la resistencia de la unión entre la nueva pasta de cemento y el mortero adherido al ACR relativamente más débil (Limbachiya, Meddah y Ouchagour, 2012 en Mjelde, 2013). Adicionalmente, relaciones agua-cemento y contenidos de aire más altos de concretos con ACR pueden contribuir con la reducción de la resistencia a la flexión.

El módulo de rotura se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$M_r = 3PL/2bh^2 \quad (2.28)$$

Donde:

M_r : Módulo de rotura, kg/cm^2 .

P : Carga máxima de rotura, kg.

L : Largo del tramo, mm.

b : Ancho promedio de la viga en la sección de falla, mm.

h : Alto promedio de la viga en la sección de falla, mm.

2.2.5.4. Correlación entre el módulo de rotura y la resistencia a la compresión

De acuerdo al Comité 363 del ACI, el M_r presenta valores que varían entre un 10% y un 20% de la resistencia a la compresión. La siguiente ecuación relaciona el módulo de rotura con la resistencia a compresión (García Ccallocunto, 2012):

$$M_r = a\sqrt{f'c} \quad (2.29)$$

Donde:

M_r : Módulo de rotura, kg/cm^2 .

f'_c : Resistencia a la compresión obtenida, kg/cm^2 .

a: constante que varía normalmente entre 1.9 – 3.18 para resistencias en kg/cm^2 a 18 días. En este caso se utilizará un valor promedio de 2.54.

2.2.6. Diseño de mezcla

La finalidad de la selección de las proporciones de los agregados es obtener una mezcla que, con un mínimo de contenido de pasta, se obtenga las propiedades deseadas del concreto que garanticen una cohesividad adecuada y una compactación total en los encofrados. El método del módulo de finura de la combinación de agregados relaciona los módulos de finura de los agregados para la selección de las cantidades relativas de los mismos de acuerdo a la fórmula 2.30. El módulo de finura del agregado es un índice de la superficie específica del agregado y a medida que aumenta, se incrementa la demanda de pasta. De mantenerse constante la pasta y de incrementar la finura del agregado, la resistencia por adherencia disminuye.

$$r_f = \frac{m_g - m}{m_g - m_f} \times 100 \quad (2.30)$$

Donde:

m: Módulo de finura de la combinación de agregados, tomado de la Tabla 16.3.10 confeccionada por Staton Walker en la Universidad de Maryland (Rivva Lopez, Concreto: Diseño de Mezcla, 2014, pág. 85) en función del factor cemento y el TMN del del agregado grueso para concretos sin aire incorporado.

m_f : Módulo de finura del agregado fino.

m_g : Módulo de finura del agregado grueso.

r_f : Porcentaje de agregado fino en relación al volumen absoluto total del agregado.

Por otro lado, al realizar el ajuste de proporciones de los materiales del concreto por resistencia, se utiliza la Ley de Powers para calcular la nueva relación A/C a partir del grado de hidratación del cemento (α) utilizando la fórmula 2.31.

$$S = 2380x^3; \text{ siendo } x = \frac{0.647 \alpha}{0.319 \alpha + a/c} \quad (2.31)$$

Donde:

S: Resistencia del concreto a los 28 días, kg/cm².

x: Relación gel/espacio.

α : Grado de hidratación del cemento.

A/C: Relación agua/cemento.

2.3. Definición de términos básicos

- **Absorción:** Proceso por el cual un líquido se introduce en los poros permeables de un cuerpo sólido poroso y tiende a llenarlos (NTP 339.047, 2014).
- **Agregado de densidad normal (agregado de peso normal):** Agregado que no es de alta ni baja densidad (Densidad relativa oscila entre 2.4 y 4.0 o con una densidad aparente que típicamente varía entre 1120 kg/m³ y 1920 kg/m³).
- **Agregado reciclado:** Agregado producido a partir del proceso de reutilización de residuos de la construcción. Pasa por los procesos de clasificaciones o limpieza, trituración primaria, trituración secundaria y trituración terciaria si son necesarias (Rozo Bobadilla, 2012).
- **Agregados:** Material granular (arena, grava, piedra triturada, o escoria de hierro de alto horno) que se utiliza con un medio de cementación para formar concreto de cemento hidráulico o mortero (NTP 339.047, 2014).
- **Aire atrapado:** Burbujas de aire (1 mm o más grandes) de forma irregular que se incorporan de forma no intencionada en una mezcla de cemento durante la mezcla y la manipulación (NTP 339.047, 2014).
- **Aire, contenido de:** Volumen de poros de aire en la pasta de cemento, mortero, y concreto, excluyendo el espacio de los poros de las partículas de agregado (NTP 339.047, 2014).

- **Apisonamiento:** Consolidación de una mezcla de cemento fresco por golpes repetidos a la superficie de la mezcla con una herramienta (NTP 339.047, 2014).
- **Arena manufacturada:** Agregado fino producido por la trituración de roca, grava, escoria de alto horno, o de concreto de cemento hidráulico (NTP 339.047, 2014).
- **Cemento Portland:** Cemento hidráulico producido mediante la pulverización del clinker de Portland compuesto esencialmente de silicatos de calcio hidráulicos y que contiene generalmente una o más de las formas de sulfato de calcio como una adición durante la molienda (NTP 339.047, 2014).
- **Compactación:** Proceso manual o mecánico que tiende a reducir el volumen total de vacíos de una mezcla de mortero o de concreto fresco (NTP 339.047, 2014).
- **Concreto:** Mezcla de material aglomerante y agregados. En el concreto normal comúnmente se usa el cemento Portland y el agua como medio aglomerante (NTP 339.047, 2014).
- **Concreto de peso normal:** Concreto producido con agregados de densidad normal, frecuentemente piedra triturada o grava, y que tiene una densidad aproximada de 2,400 kg/m³ (NTP 339.047, 2014).
- **Concreto reciclado:** Concreto cuyo agregado proviene parcial o completamente de granulados de concreto, gravas y arenas de reciclaje (D.S. N° 003-2013, 2013).
- **Densidad:** Es la masa por unidad de volumen de un material, (preferido a la expresión peso unitario) (NTP 339.047, 2014).
- **Densidad aparente del agregado:** Masa de una unidad de volumen de material de agregado (el volumen de la unidad incluye el volumen de las partículas individuales y el volumen de los poros entre las partículas) (NTP 339.047, 2014).
NOTA: Este término sustituye a la unidad de peso del agregado, término obsoleto.
- **Densidad relativa:** Relación de la densidad del material a una temperatura señalada con la densidad del agua destilada a la misma temperatura. Por lo general 23 °C (NTP 339.047, 2014). Antiguamente conocido como peso específico.
- **Escombreras:** Las escombreras son instalaciones para albergar los residuos de las actividades de construcción y demolición (OEFA, 2014).
- **Grava triturada:** Producto resultante de la utilización de dispositivos mecánicos para romper las partículas de grava en fragmentos más pequeños (NTP 339.047, 2014).

- **Masa unitaria (masa volumétrica, densidad):** Masa volumétrica del concreto fresco o del agregado, que normalmente se determina pesándose un volumen conocido de concreto o agregado (la densidad a granel o suelta de los agregados incluye los vacíos entre las partículas) (NTP 339.047, 2014).
- **Porcentaje de reemplazo (PR):** Definido como la relación entre el volumen del agregado reciclado y el volumen total del agregado en una mezcla de concreto.
- **Residuos de construcción y demolición (RCD):** Residuos generados en las actividades y procesos de construcción, rehabilitación, restauración, remodelación y demolición de edificaciones e infraestructura (D.S. N° 003-2013, 2013).
- **Residuos municipales:** Conformados por los residuos domiciliarios y los provenientes del barrido y limpieza de espacios públicos incluyendo: playas, actividades comerciales y otras actividades urbanas no domiciliarias cuyos residuos se pueden asimilar a los servicios de limpieza pública, en todo el ámbito de su jurisdicción (D.L. N° 1278, 2016).
- **Residuos no municipales:** Son aquellos de carácter peligroso y no peligroso que se generan en el desarrollo de actividades extractivas, productivas y de servicios. Comprenden los generados en las instalaciones principales y auxiliares de la operación (D.L. N° 1278, 2016).
- **Resistencia individual:** Resistencia a compresión de un cilindro, parte del resultado tal del ensayo a compresión (ACI Committee 214, 2011).

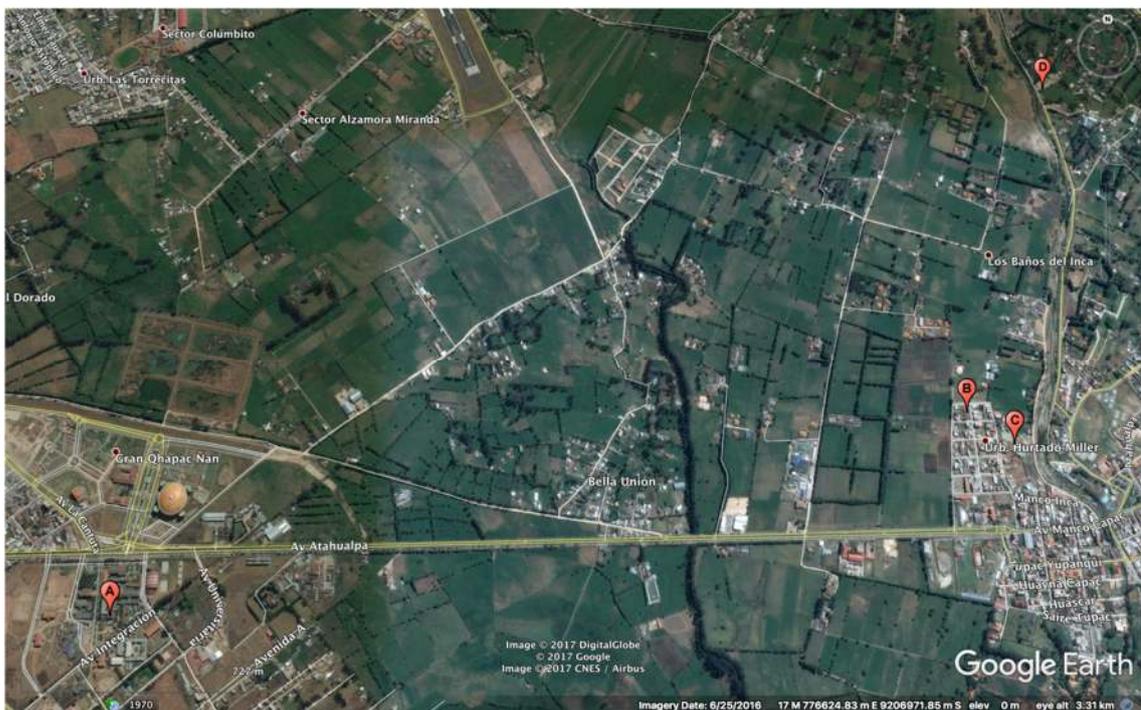
CAPITULO III: MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación geográfica

La demolición donde se obtuvo el material de estudio se ubica en la Urbanización Hurtado Miller del distrito de los Baños del Inca, Provincia y Región de Cajamarca. El agregado grueso natural fue obtenido de la cantera “Tartar Chico” ubicada a 1.5 km de la carretera Baños del Inca – Otuzco. El agregado fino natural fue obtenido de la Planta Chancadora “Roca Fuerte,” lugar donde también se proceso el agregado de concreto reciclado. Ambos agregados naturales fueron extraídos del río Chonta en los Baños del Inca aproximadamente a 2,670 m.s.n.m.

Finalmente, el experimento se realizó en el Laboratorio de Ensayo de Materiales “Carlos Esparza Díaz” (A) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cajamarca.

Figura 3.1 Localización de canteras y laboratorio



3.2. Diseño de la investigación

La presente investigación tiene un enfoque cuantitativo del tipo aplicado con un diseño experimental puro, de acuerdo a los criterios considerados por Hernández, Fernández & Baptista, 2010, págs. 121-149. La investigación fue desarrollada en tres etapas: campo, laboratorio y gabinete. La etapa de campo cubre la reducción de los

bloques de concreto en obra y la trituración de los mismos en la planta chancadora Roca Fuerte ubicada en los Baños del Inca hasta la obtención del agregado deseado. La etapa de laboratorio abarca la caracterización físico-mecánica de los agregados naturales y reciclados, los ensayos del concreto fresco (asentamiento, contenido de aire, densidad y temperatura del concreto) y los ensayos de resistencia mecánica a compresión y flexión del concreto endurecido. Finalmente, la etapa de gabinete comprende la caracterización físico-mecánica de los agregados, los ensayos de concreto fresco y endurecido. Además, se incluye el diseño de mezcla usando el método del módulo de finura de la combinación de agregados y la evaluación económica del experimento.

Para la obtención de datos, los agregados naturales fueron reemplazados por los agregados grueso y fino reciclados por volumen en diferentes porcentajes de reemplazo. Este diseño abarca un grupo de control y cinco grupos experimentales. El primer grupo corresponde a las muestras cilíndricas del concreto patrón elaboradas solamente con agregado natural y ensayadas a los 7, 14 y 28 días de endurecimiento. De los cinco grupos experimentales, uno de ellos corresponde a los especímenes cilíndricos de concreto elaborados solamente con agregados reciclados y ensayados a compresión a los 28 días de endurecimiento. Los cuatro grupos restantes se refieren a las muestras cilíndricas de concreto elaborados con agregado reciclado al 20%, 30%, 40% y 50% del PR y ensayados a compresión a los 7, 14 y 28 días de endurecimiento.

El diseño de la investigación con grupo de control se diagrama de la siguiente manera:

G ₁	X ₁ (20 PR)	0 ₁
G ₂	X ₂ (30 PR)	0 ₂
G ₃	X ₃ (40 PR)	0 ₃
G ₄	X ₄ (50 PR)	0 ₄
G ₅	X ₅ (100 PR)	0 ₅
G ₆	– (0 PR)	0 ₆

Donde:

G_x: Grupo de sujetos.

X: Condición experimental.

O_x: Medición de los sujetos de un grupo (Posprueba).

–: Grupo de control.

PR: Porcentaje de reemplazo.

Luego de verificar la resistencia a compresión de los grupos experimentales, se fabricaron doce especímenes prismáticos para ser ensayados a flexión. Seis de los cuales fueron elaborados usando el diseño de mezcla del grupo de control y seis utilizando el diseño del grupo que tiene la mejor resistencia a compresión a los 28 días.

Para la selección de las unidades de análisis y observación, se han considerado los criterios de las recomendaciones del Comité ACI 214, 2011 *Evaluation of Strength Test Result of Concrete* y la Norma Técnica Peruana NTP 339.183, 2013: Práctica normalizada para la elaboración y curado de especímenes de concreto en laboratorio, además de otras Normas Técnicas Peruanas. Finalmente, los instrumentos fueron aplicados durante la etapa de laboratorio.

3.3. Población, muestra, unidades de análisis y unidad de observación

La población del estudio es el total de los especímenes cilíndricos de concreto con agregados natural y reciclado de resistencia $f'_c=250 \text{ kg/cm}^2$ en los PR establecidos en la presente investigación. El muestreo de 99 probetas es no probabilístico del tipo espontánea, la unidad de análisis es el espécimen de concreto de 6" x 12" de acuerdo a la Norma ASTM C470, y las unidades de observación son los agregados naturales y reciclados. La selección de la resistencia de diseño, $f'_c=250 \text{ kg/cm}^2$, estuvo en función del costo de la producción del concreto de peso normal y de las propiedades físico-mecánicas del agregado reciclado, considerando que no se cuenta con las características del agregado original ni de la pasta de cemento adherida al concreto original.

3.4. Matriz de consistencia metodológica

La matriz de consistencia metodológica se detalla en el cuadro 3.1.

3.5. Materiales y equipos

3.5.1. Materiales

3.5.1.1. Agregados Naturales

El agregado grueso utilizado en este proyecto proviene de la cantera Tartar Chico del río Chonta ubicada en el kilómetro 1.5 de la carretera Baños del Inca – Otuzco, el

Cuadro 3.1 Matriz de consistencia metodológica

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	INSTRUMENTOS	METODOLOGÍA	POBLACIÓN Y MUESTRA
<i>General</i>				<i>Variable independiente</i>		Normas Técnicas Peruanas y/o Estándares ASTM de agregados, concreto fresco y endurecido correspondientes.	<i>Enfoque:</i> Cuantitativo. <i>Tipo:</i> Aplicado o tecnológico. <i>Nivel:</i> Descriptivo. <i>Método:</i> Experimental puro.	<i>Población:</i> Especímenes cilíndricos de concreto con agregados natural y reciclado de resistencia $f'_c=250$ kg/cm ² en los PR establecidos en la presente investigación. <i>Muestra:</i> No probabilístico del tipo espontánea (99 especímenes). <i>Unidad de análisis:</i> Espécimen de concreto cilíndrico de 6" x 12" (ASTM C470). <i>Unidad de observación:</i> agregados naturales y reciclados.
¿Cuál es la resistencia a compresión del concreto elaborado con agregado de concreto reciclado obtenido de los residuos de la demolición de una edificación para la elaboración de un concreto $f'_c=250$ kg/cm ² ?	Realizar el estudio tecnológico del concreto $f'_c=250$ kg/cm ² elaborado con agregados reciclados (ACR) usados en edificaciones.	El uso de ACR en la fabricación de un concreto $f'_c=250$ kg/cm ² aumenta su resistencia a compresión en un 20% en comparación al concreto de control.	Agregados reciclados.	Granulometría	Husos granulométricos			
				Densidad promedio de	Densidad de agregados de peso normal			
				Densidad de masa y vacíos				
				Resistencia a la abrasión	Pérdida < 50%			
				Material más fino < 75µm	Agregado fino < 5%			
				Contenido de humedad	-			
<i>Específicos</i>				<i>Variable dependiente</i>				
<ul style="list-style-type: none"> ¿Cuáles son las propiedades de los AN y ACR? ¿Cuáles es el diseño de mezcla del concreto de control y del concreto con ACR? ¿Qué resultados se tiene obtiene de los ensayos del concreto fresco y endurecido? 	<ul style="list-style-type: none"> Determinar y comparar las propiedades de los AN y ACR. Diseñar las mezclas del concreto de control y del concreto con ACR. Comparar y analizar los resultados de los ensayos del concreto fresco y endurecido. 		Resistencia mecánica a la compresión del concreto endurecido.	Concreto fresco				
				Temperatura	± 23 °C			
				Contenido de aire	-			
				Asentamiento	3" – 4"			
				Densidad	Densidad de concreto normal			
				Concreto endurecido				
Resistencia a la compresión	≥ 250 kg/cm ²							
Resistencia a flexión	10% - 20% de \bar{X}							

cual fue primero lavado para eliminar el exceso de finos. El agregado fino utilizado proviene de la Planta Chancadora “Roca Fuerte” ubicada en el Jr. Cahuide #334 del distrito Baños del Inca. Inicialmente, el agregado fino contenía un porcentaje de material más fino que $75\ \mu\text{m}$ (malla N° 200) mayor al permitido de 5%, establecido en la Norma NTP 400.037, 2014. Posteriormente, el agregado fue lavado y a pesar que el mismo no cumple con el huso granulométrico indicado en la tabla 2.1, se aceptó su uso ya que se produjo un concreto de la resistencia y calidad requerida.

3.5.1.2. Agregado de concreto reciclado

El ACR utilizado en este estudio fue obtenido de la demolición de una vivienda ubicada en la Urb. Hurtado Miller del distrito de Los Baños de Inca. La vivienda unifamiliar fue parcialmente construida a inicios de los años noventa con un préstamo del Banco de Materiales; sin embargo, ésta no fue terminada. El ACR fue seleccionado de vigas, columnas y sobrecimientos. El material fue reducido manualmente a bloques de 10” de diámetro. Aproximadamente, se obtuvo aproximadamente un total de tres m^3 de concreto, el mismo que fue transportado a la Planta Chancadora “Roca Fuerte” para ser procesado hasta obtener el agregado deseado. La sección 3.4.1.1 detalla el proceso de trituración y cernido del ACR.

Aproximadamente, 40% de la pila del ACR producido consistió de un agregado fino, el 60% restante consistió de agregado grueso. El material fue tamizado utilizando las mallas de $\frac{3}{4}$ ”, $\frac{1}{2}$ ” y N° 4 incorporadas al sistema mecanizado de la chancadora secundaria. Para este proyecto de investigación, se incorporó tanto como agregado grueso y fino. Durante el proceso, todo el material fue lavado utilizando tres bombas de agua que extraen agua del río Chonta.

3.5.1.3. Cemento

El cemento utilizado durante esta investigación fue Portland Tipo I producido en Pacasmayo, el cual tiene un peso específico de $3.12\ \text{g/cm}^3$.

3.5.1.4. Agua

El agua utilizada para las mezclas y curado proviene de la red interna de la Universidad Nacional de Cajamarca, considerada como agua potable.

3.5.2. Equipos

- Juego de tamices: 1", ¾", ½", 3/8", N° 4, N° 8, N° 16, N° 30, N° 50, N° 100 y N° 200.
- Estufa a temperatura constante de 110°C ± 5 °C.
- Fiola de vidrio de 500 ml.
- Balanzas con sensibilidad de 0.5 g, 1 g, y 5 g y capacidad de 5 kg y 30 kg.
- Cesta metálica con abertura menor a 3 mm.
- Baldes de plástico.
- Palas.
- Esferas de acero.
- Bomba de vacíos.
- Máquina de Los Ángeles.
- Equipo medidor de aire tipo B, marca STANLEY.
- Termómetro de vidrio con aproximación 1 °C.
- Termómetro digital con aproximación 0.5°C.
- Mezcladora de concreto eléctrica.
- Barra compactadora de acero, circular, recta de ½" de diámetro y 60 cm de largo con un extremo redondeado.
- Moldes cilíndricos de acero para concreto.
- Máquina para ensayo de compresión de concreto.
- Máquina para ensayo de flexión de concreto.

3.6. Procedimiento

La sección Procedimiento está dividida en tres subcapítulos: (1) la etapa de campo se refiere al procesamiento del ACR y agregados naturales en obra y en canteras. (2) La etapa de laboratorio corresponde al procedimiento seguido para realizar los ensayos de caracterización de los agregados, la elaboración del concreto y los ensayos del concreto fresco y endurecido. (3) En la etapa de gabinete se incluye el diseño de mezcla de los concretos y el análisis de los resultados del experimento.

3.6.1. Etapa de campo

3.6.1.1. Procesamiento del ACR

En primer lugar, los materiales utilizados en el estudio son seleccionados manualmente de los RCD de la obra. Principalmente, se prefirió seleccionar vigas de

cimentación, columnas y sobrecimientos, los mismos que fueron reducidos manualmente por obreros contratados a bloques de aproximadamente 10” de diámetro. Posteriormente, los bloques fueron trasladados a la Planta Chancadora “Roca Fuerte” para ser procesado hasta obtener el agregado deseado.

La planta cuenta con dos sistemas de trituración primario y secundario separados entre sí. El sistema primario consta de una chancadora tipo quijada de 6” que procesa el material hasta obtener agregado con diámetro menor a 3”. El agregado es transportado mediante una faja transportadora y es recibido por el cucharón de una retroexcavadora. Posteriormente, el material es transportado al sistema secundario, el mismo que consta de una chancadora secundaria con características similares a la chancadora primaria, con la diferencia que esta procesa material menor a 3” de diámetro. La chancadora secundaria también cuenta con un sistema de fajas transportadoras que transportan el material a una serie de tamices mecánicos de 3/4”, 1/2” y 3/8” de diámetro. Durante el proceso secundario, un sistema de bombeo extrae agua del río Chonta y la agrega en las fajas transportadoras para eliminar la mayor cantidad de finos del material. Posteriormente, el ACR fue transportado al Laboratorio de Materiales en la Universidad Nacional de Cajamarca y apilado sobre una manta de plástico para evitar su contaminación al igual que los agregados naturales

3.6.2. Etapa de laboratorio

3.6.2.1. Propiedades físico-mecánicas de los agregados

Se realizaron seis ensayos para caracterizar las propiedades físicas (granulometría, densidad relativa, densidad de masa y vacíos, absorción, material menor que 75 micras) de los agregados, y un ensayo de caracterización mecánica para los agregados gruesos (Abrasión Los Ángeles). Todos los ensayos fueron realizados tres veces como mínimo cada uno, siguiendo los procedimientos establecidos por las Normas Técnicas Peruanas correspondientes y descritas en los acápite anteriores.

Antes de realizar los ensayos de caracterización, los materiales fueron muestreados de las pilas de los productos acabados siguiendo los procedimientos indicados en la Norma NTP 400.010, 2016: “Extracción y preparación de las muestras.” Se obtuvo tres incrementos iguales de las pilas de cada material y se recombino el material para luego ser reducido a tamaños de ensayo de acuerdo a la Norma ASTM C 702, 1998: *Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size*. Específicamente, se utilizó

el procedimiento descrito en el Método B – Cuarteo hasta obtener el tamaño de muestra necesario para cada ensayo.

3.6.2.1.1. Análisis granulométrico

El análisis granulométrico de los agregados naturales y reciclados fue realizado siguiendo los procedimientos descritos en la Norma NTP 400.012, 2013. Para el caso de los agregados finos, la muestra fue previamente ensayada por el método descrito en la Norma NTP 400.018, 2013 para determinar la cantidad de material más fino que la malla de 75 μm (N° 200).

El primer paso del análisis granulométrico fue secar las muestras a peso constante a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, por lo general por 24 horas. Se utilizaron los tamices de 1”, 3/4”, 1/2”, 3/8”, N° 4 y N° 8 para los agregados gruesos; y los tamices de 3/8”, N° 4, N° 8, N° 16, N° 30, N° 50, N° 100 y N° 200 para los agregados finos. Los agregados fueron tamizados manualmente en orden decreciente y se limitó la cantidad de material sobre cada tamiz para permitir que las partículas tengan la oportunidad de pasar por la abertura del tamiz inferior. Posteriormente, se determinó la masa de cada incremento de medida sobre una balanza con aproximación de 0.1 g. La masa total del material luego del tamizado fue contrastada con la masa seca original de la muestra, corroborándose que la cantidad sea menor al 0.3% para que el ensayo sea aceptado.

Finalmente, se calcularon los porcentajes retenidos acumulados y los porcentajes que pasan aproximados al 0.1% más cercano de la masa seca inicial de la muestra. Para el caso de los agregados finos, se incluyeron las masas de los materiales más finos que la malla N° 200 calculada por el método de lavado al total de la masa de la muestra seca para calcular todos los porcentajes. El módulo de fineza se determinó al sumar el porcentaje acumulado retenido de material de los siguientes tamices y dividir la suma entre 100: N° 100, N° 50, N° 30, N° 16, N° 8, N° 4, 3/8” y 3/4”.

3.6.2.1.2. Densidad promedio de partículas (sin orificios entre partículas) y densidad relativa (peso específico) del agregado grueso

Como se ha dicho anteriormente, la Norma NTP 400.021, 2013 establece los procedimientos para determinar la densidad promedio de partículas (sin incluir los orificios entre las partículas), la densidad relativa y la absorción del agregado grueso.

En primer lugar, se rechazó el material que pasa por el tamiz N° 4 y se redujo la muestra de ensayo a una masa mínima de 3 kg. La muestra fue lavada cuidadosamente para eliminar el polvo de la superficie. Posteriormente, la muestra fue secada en una estufa a una temperatura de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta una masa constante. Luego, la muestra fue sumergida en agua a temperatura ambiente durante un período de $24\text{ h} \pm 4\text{ h}$.

La muestra fue retirada del agua y secada sobre un paño absorbente hasta eliminar las partículas visibles de agua. Las partículas más grandes fueron secadas individualmente. Al finalizar, se determinó la masa de la muestra en la condición de la superficie saturada seca (SSS). Después de la determinación de la masa en aire, la muestra (SSS) fue inmediatamente colocada en la rejilla para ser sumergida en agua y determinar su masa sumergida. Finalmente, la muestra fue secada en la estufa hasta una masa constante a temperatura de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y se determinó su masa.

3.6.2.1.3. Densidad promedio de partículas (sin orificios entre partículas) y densidad relativa (peso específico) del agregado fino

Los procedimientos para determinar la densidad promedio de partículas del agregado fino (no incluye los orificios entre partículas), la densidad relativa, y la absorción del agregado fino están establecidos en la Norma NTP 400.022, 2013.

Al igual que el agregado grueso, la muestra del agregado fino fue secada en una estufa por 24 horas a una temperatura de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta una masa constante para luego ser saturada en agua por 24 ± 4 horas adicionales. Seguidamente, se decantó el exceso de agua con cuidado para evitar la pérdida de finos ($< 75\text{ }\mu\text{m}$) con la intención de evitar diferencias significativas en los resultados de las densidades. La muestra fue extendida en una bandeja metálica para ser secada utilizando una secadora eléctrica moviéndola constantemente con un cucharón hasta lograr la condición de saturada superficialmente seca por medio del ensayo de humedad superficial.

El ensayo de humedad superficial consiste en colocar una porción del agregado fino en un molde cónico estandarizado llenándolo hasta un poco más del tope. Luego, el material es apisonado con 25 golpes utilizando una barra compactadora siempre a 5 mm por encima de la superficie superior del agregado fino. Se retira la arena suelta de la base y se levanta el molde verticalmente. La ligera caída del agregado fino moldeado indica que se ha llegado a un estado de superficie seca. De lo contrario, el agregado fino conservará la forma del molde de tener todavía humedad superficial.

Al realizar el primer ensayo de humedad superficial en algunas oportunidades, la muestra se desmoronaba rápidamente al retirar el molde metálico, lo cual indica que la humedad superficial no estaba presente en la superficie. En este caso, la muestra fue mezclada con unos pocos mililitros de agua, dejándola reposar durante 30 minutos para luego reanudar la prueba de humedad superficial.

Una vez obtenida la condición saturada superficialmente seca, se utilizó una muestra de $200 \text{ g} \pm 10 \text{ g}$ del agregado fino en esta condición para ser ensayada siguiendo el procedimiento gravimétrico utilizando una fiola de vidrio de 500 ml. Se llenó parcialmente la fiola con agua, se introdujo la muestra del agregado fino (SSS) y se llenó de agua adicional hasta aproximadamente el 90% de su capacidad. Se agitó la fiola manualmente para eliminar las burbujas de aire visibles y se utilizó una bomba de vacíos para eliminar las burbujas restantes.

Posteriormente, se llenó la fiola de agua hasta el nivel de calibración. Se determinó la masa total de la fiola, la muestra y el agua. Se retiró el agregado fino de la fiola, se secó en el horno a una temperatura de $110 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ hasta una masa constante y se determinó su masa. Finalmente, se determinó la masa de la fiola y de la fiola y el agua llena hasta el nivel de calibración.

3.6.2.1.4. Absorción

Como se ha dicho anteriormente, las Normas NTP 400.021, 2013 y NTP 400.022, 2013 establecen los procedimientos para determinar la absorción de agregados grueso y fino, los mismos que están detallados en los acápites 3.4.2.1.2 y 3.4.2.1.3, respectivamente. El cálculo de la absorción para los agregados gruesos y finos se realizó utilizando las fórmulas 2.1 y 2.2.

3.6.2.1.5. Densidad de masa y vacíos

Este método de ensayo es aplicable a los agregados que no excedan los 125 mm del TMN. Dependiendo del TMN del agregado, se escogerá la capacidad del recipiente cilíndrico metálico de acuerdo a la tabla 1, Capacidad de los recipientes, establecida en la Norma NTP 400.017, 2016. La capacidad mínima del recipiente de este estudio es de 9.3 litros para un agregado de TMN de $\frac{3}{4}$ ". El tamaño de la muestra fue aproximadamente de 125% a 200% la cantidad requerida para llenar el recipiente, la misma que fue secada en una estufa por 24 horas a una temperatura de $110 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ hasta una masa constante.

Antes de comenzar el ensayo, los recipientes para los agregados fueron calibrados utilizando una placa de vidrio, grasa y agua. Se determinó la masa de la placa de vidrio y el recipiente con exactitud de 0.05 kg. Se colocó una capa delgada de grasa sobre el borde del recipiente para prevenir la fuga de agua del recipiente y se llenó de agua a temperatura ambiente. El recipiente fue cubierto con la placa de vidrio para eliminar las burbujas y exceso de agua. Se determinó la masa de agua, placa de vidrio y recipiente y se midió la temperatura del agua con exactitud de 1°C. Seguidamente, se determinó la densidad del agua extrapolando el valor de la temperatura del agua determinada en laboratorio utilizando la tabla 2.8. Se determinó el factor F (1/m³).

Para el caso de la densidad de masa del agregado en condición compactada, se siguió el procedimiento de apisonado. En primer lugar, se llenó el recipiente a un tercio del total, se niveló la superficie con los dedos y se apisonó la capa de agregado con 25 golpes con la varilla de apisonado uniformemente distribuido sobre la superficie. Luego, se llenó el recipiente a los 2 tercios del total y nuevamente se niveló y apisonó como la primera capa. Finalmente, se llenó el recipiente a sobre-volumen y se apisonó nuevamente de la forma indicada anteriormente. Se niveló la superficie del agregado con los dedos y una varilla de acero de manera que cualquier proyección leve de las partículas mas grandes del agregado grueso equilibre los vacíos mayores en la superficie por debajo de la parte superior del recipiente. El apisonado de la primera capa fue realizado de tal manera que no se golpee el fondo del recipiente y el apisonado de las otras dos capas fue realizado vigorosamente sin que la varilla de acero penetre la capa previa del agregado.

Para el caso de la densidad de masa del agregado en condición suelta, el recipiente fue llenado con el material hasta el reboce utilizando un cucharón, descargando el agregado de una altura menor a 50 mm encima del borde superior del recipiente. Al realizar el llenado, se tuvo mucho cuidado a fin de prevenir la segregación del material. Seguidamente, se procedió a nivelar la superficie del agregado con los dedos para equilibrar los vacíos mayores en la superficie por debajo de la parte superior del recipiente. Se determinó la masa del recipiente más su contenido y la masa del recipiente vacío. Para ambos casos, se determinó la masa del recipiente más su contenido y la masa del recipiente vacío con exactitud de 0.05 kg.

3.6.2.1.6. Resistencia a la abrasión del agregado grueso

Considerando que el TMN del agregado grueso del presente estudio es $\frac{3}{4}$ ", se ha seguido el procedimiento establecido por la Norma NTP 400.019, 2014 para determinar la resistencia a la degradación en agregados gruesos de tamaños menores que 37.5 mm (1 1/2") por abrasión e impacto en la máquina de Los Ángeles. La Norma NTP 400.020 establece el procedimiento para ensayar agregados gruesos de tamaños mayores que 19.0 mm (3/4").

El procedimiento establece que, dependiendo de la gradación de la muestra de ensayo, se determinará la cantidad de esferas de acero y la cantidad de material utilizado en el ensayo de cada fracción individual retenida entre los tamices indicados en Tabla 1 de la Norma NTP 400.019, 2014. Para la presente investigación, la gradación de la muestra de ensayo, *Gradación B*, indica que se necesitan 11 esferas con una masa total de carga de 4584 ± 25 g. Además, la gradación B de la muestra lavada y secada al horno en una estufa por 24 horas a una temperatura de $110 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ hasta una masa constante debe consistir en dos fracciones individuales de la siguiente manera: (1) 2500 ± 10 g de material que pasa la malla 19.0 mm (3/4") y se retiene en la malla de 12.5 mm (1/2") y (2) 2500 ± 10 g de material que pasa la malla 12.5 mm (1/2") y se retiene en la malla de 9.5 mm (3/8"). La masa de la muestra fue registrada con aproximación a 1 gramo.

Seguidamente, la muestra de ensayo y las esferas de acero fueron colocadas en la máquina de Los Ángeles, la misma que fue rotada por 500 revoluciones. Luego se retiró el material de la máquina para ser separado utilizando el tamiz normalizado de 1.7 mm (N° 12). El material más grueso que el tamiz N° 12 fue lavado y secado al horno por 24 horas a una temperatura de $110 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ hasta una masa constante. Finalmente, se determinó la masa con una aproximación de 1 g.

3.6.2.1.7. Material más fino que pasa por el tamiz de 75 μm (N° 200)

El procedimiento para determinar la cantidad de material más fino que pasa el tamiz de 75 μm utilizado en esta investigación es el procedimiento A – Lavado con agua establecido en la Norma NTP 400.018, 2013. Las muestras del agregado grueso utilizadas en este ensayo no fueron utilizadas para el análisis granulométrico. Por otro lado, las muestras del agregado fino utilizadas en este ensayo también fueron utilizadas en el análisis granulométrico del agregado fino. En este caso, la cantidad de material más fino

que el tamiz de 75 μm determinada por lavada fue adicionada a la cantidad determinada en el análisis granulométrico (NTP 400.012, 2013).

En primer lugar, la muestra de ensayo fue secada a peso constante a una temperatura de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta una masa constante con una aproximación del 0.1% de la masa de la muestra de ensayo. Seguidamente, la muestra de ensayo fue colocada en un recipiente para ser cubierta con agua. No se agregaron detergentes, agentes dispersantes, ni alguna otra sustancia al agua. Se agitó vigorosamente la muestra con el fin de separar completamente todas las partículas más finas que el tamiz normalizado de 75 μm (N° 200) de las partículas gruesas, y llevar el material fino a la suspensión. Luego se virió inmediatamente el agua de lavado conteniendo los sólidos suspendidos y disueltos sobre los tamices de 1.18 mm (N° 16) y de 75 μm (N° 200), colocando el tamiz más grueso en la parte superior. Este proceso fue repetido hasta que el agua de lavado esté clara. Finalmente, el material retenido sobre los tamices fue devuelto y secado a peso constante a una temperatura de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta una masa constante. La masa de la muestra fue determinada con aproximación del 0.1% de la masa original de la muestra.

3.6.2.1.8. Contenido de humedad

La metodología utilizada del ensayo normalizado para determinar el contenido de humedad total evaporable de agregados por secado está establecida por la Norma NTP 339.185, 2002. La cantidad de muestra utilizada para realizar este ensayo depende del tamaño máximo nominal del agregado. Para un agregado con un TMN de $\frac{3}{4}$ " le corresponde 3 kg de muestra y para un agregado fino con un TMN de 4.75 mm (N° 4) le corresponde una muestra mínima de 0.5 kg.

En primer lugar, se determinaron las masas de las muestras con una precisión del 0.1%. Luego, las muestras fueron secadas a peso constante a una temperatura de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 24 horas. Finalmente se determinaron las masas de las muestras secas con una aproximación de 0.1%. Cabe resaltar que este ensayo fue realizado para obtener la humedad natural de los agregados y para determinar su humedad un día antes de la elaboración del concreto en laboratorio.

El contenido de humedad superficial es igual a la diferencia entre el contenido de humedad total evaporable y la absorción, con todos los valores referidos a la masa de una muestra seca.

3.6.2.2. Concreto fresco

El concreto de este proyecto de investigación fue elaborado y curado siguiendo los procedimientos descritos en la Norma NTP 339.183, 2013. Como se ha indicado en la tabla 1.1, 99 especímenes cilíndricos de concreto fueron elaborados y ensayados a compresión desde el 14 de setiembre hasta el 06 de noviembre del 2017, de acuerdo a la programación adjunta en el Anexo C. Adicionalmente, 12 especímenes prismáticos fueron elaborados y ensayados a flexión desde el 09 de octubre al 02 de diciembre del 2017.

Antes de mezclar el concreto, los materiales fueron preparados para que cumplan las especificaciones establecidas en dicha Norma. El cemento fue almacenado en un lugar seco sobre una parihuela de madera. Los agregados gruesos fueron separados en dos fracciones individuales separadas por el tamiz de 12.5 mm ($\frac{1}{2}$ ") de diámetro para evitar su segregación y recombinadas en las proporciones adecuadas al elaborar el concreto en la mezcladora eléctrica. Los agregados finos no fueron separados en fracciones individuales pero se mantuvieron en condición húmeda hasta su uso para prevenir segregación.

Una vez preparados los materiales, el concreto fue mezclado en una mezcladora eléctrica en tandas máximas de 0.05 m³. Las tandas permitieron un excedente mínimo del 10% que permitan completar el volumen del concreto compactado en los moldes. Previo al inicio de rotación de la mezcladora, se añadió el agregado grueso y una parte del agua de mezcla. Luego, se agregó el agregado fino, el cemento y el agua restante con la mezcladora en funcionamiento. El concreto fue mezclado durante 3 minutos seguido por 3 minutos de reposo y luego 2 minutos finales de mezclado. El concreto mezclado fue colocado en una carretilla limpia y húmeda y remezclada con una lampa hasta obtener una consistencia uniforme.

Se determinaron los parámetros de asentamiento de acuerdo a la Norma NTP m339.035, contenido de aire de acuerdo al método de presión de la Norma NTP 339.083, rendimiento (Norma NTP 339.046) y temperatura del concreto de acuerdo a la Norma NTP 339.184.

En lo que respecta a la elaboración de los especímenes del concreto, los moldes fueron colocados en una superficie rígida, plana y libre de vibraciones. Se colocó el concreto en los moldes utilizando un cucharón colmado de concreto de tal manera que

asegure ser representativo de la tanda. Se mueve el cucharón alrededor del borde superior del molde mientras el concreto es descargado con el fin de asegurar una distribución simétrica del concreto y minimizar la segregación del agregado grueso dentro del molde. Se distribuye bien el concreto utilizando la varilla compactadora antes de ser consolidado. Para especímenes de 150 mm (6”) de diámetro, se realizaron 3 capas de un volumen aproximadamente igual. Se varilló cada capa con el extremo redondeado de la varilla usando 25 golpes. La primera capa fue varillada en toda su profundidad, la segunda y la tercera capas fueron varilladas se penetró 1” aproximadamente en la capa inferior. Después de cada varillado, se golpearon los lados del molde suavemente de 10 a 15 veces con el martillo de goma para cerrar cualquier espacio vacío producido por el varillado y para eliminar las burbujas grandes de aire que puedan haber quedado atrapadas.

En el caso de los especímenes prismáticos, se realizaron 2 capas de un volumen aproximadamente igual y se consolidó varillando el concreto una vez por cada 7 cm² (1 pulg²) de superficie. Finalmente, las superficies de los concretos fueron acabadas enrasando, alisando y emparejando para evitar depresiones o proyecciones mayores a 3 mm.

Una vez concluida la elaboración del concreto, los moldes fueron almacenados en el laboratorio techado por 24 horas, cubiertos con bolsas de plástico para la pérdida de humedad. Seguidamente, los especímenes fueron desmoldados y saturados de agua en la poza de curado del laboratorio a la que se agregó hidróxido de calcio hasta el día del ensayo del concreto endurecido.

3.6.2.3. Concreto endurecido

Los procedimientos para determinar la resistencia a la compresión del concreto en muestras cilíndricas y la resistencia a la flexión del concreto en vigas simplemente apoyadas con cargas en el centro del tramo están establecidos en las Normas NTP 339.034, 2013 y NTP 339.079, 2012, respectivamente.

3.6.2.3.1. Resistencia a compresión

Antes de realizar los ensayos de resistencia a compresión de los especímenes cilíndricos de concreto, se determinaron el diámetro, longitud y masa de cada probeta. El diámetro fue medido utilizando un *vernier* electrónico y verificado para que dos mediciones de cada cilindro no difiera en más de 2% (su promedio corresponde a 3

mediciones tomadas equidistantemente). Se determinó el área promedio (A_{prom}). La longitud de cada espécimen fue tomada en tres espacios separados equidistantemente y promediada con una aproximación de 1 mm.

Antes de realizar los ensayos de resistencia a compresión, los testigos de concreto fueron retirados de la poza de curado y secados superficialmente sin permitir pérdida de humedad. Los cilindros fueron ensayados en condición húmeda.

El ensayo de resistencia a compresión axial fue realizado utilizando la máquina universal (Amsler) de 200 toneladas de capacidad del Laboratorio de Mecánica de Materiales. Para distribuir la carga uniformemente, se utilizaron dos almohadillas de neopreno colocadas en las caras planas de los cilindros. Cuidadosamente, se alinearon los ejes del espécimen con el centro de empuje del cabezal fijo de la máquina y se ajustó el cabezal móvil al testigo de concreto. Seguidamente, se verificó que el indicador de carga este en cero y se instaló el deformímetro en su lugar. De acuerdo a norma, la carga debe ser aplicada a una velocidad de esfuerzo de $2.5 \text{ kg/cm}^2/\text{s} \pm 0.5 \text{ kg/cm}^2$. En práctica, la carga fue aplicada a una velocidad mayor controlada durante el primer tramo del ensayo y luego fue reducida a una velocidad constante promedio de $2 \text{ kg/cm}^2/\text{s}$ hasta la rotura final. A medida que la carga fue aplicada, se registró la deformación del concreto con ayuda de una cámara fotográfica. Una vez realizados los ensayos de resistencia a compresión, se registró la carga máxima alcanzada y se examinó el tipo de fractura de los especímenes de concreto de conformidad con la figura 2.1.

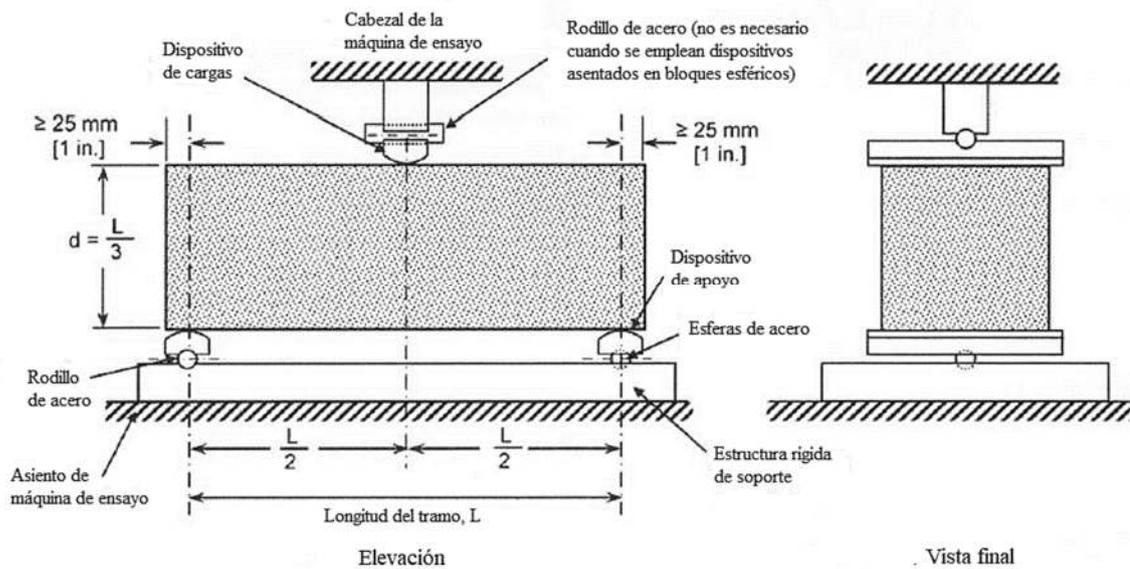
3.6.2.3.2. Módulo de elasticidad

Para el cálculo del módulo de Young, se registraron las deformaciones cada 1000 kg sin interrupciones de carga. Especialmente, se registraron las deformaciones en dos puntos: (1) cuando la deformación unitaria es 50 millonésimas y (2) cuando la carga aplicada sea igual al 40% de la carga última. Interpolar de ser necesario.

3.6.2.3.3. Resistencia a flexión

Para el ensayo de resistencia a la tracción por flexión de los especímenes prismáticos, se utilizó la máquina de ensayo del Laboratorio de Materiales de la Facultad. El mecanismo de carga emplea un bloque de aplicación de carga y dos bloques de soporte del espécimen. La carga fue aplicada perpendicularmente a la cara superior de la viga, evitando toda excentricidad (Ver figura 3.2).

Figura 3.2. Diagrama del dispositivo para la prueba de flexión del concreto



Fuente: NTP 339.079, 2012.

Los especímenes prismáticos fueron preparados de tal manera forma que la viga tenga una luz libre entre apoyos equivalente a tres veces su altura de acuerdo a la Norma NTP 339.033 y NTP 339.183.

Para la prueba de flexión, el espécimen fue centrado sobre los bloques de apoyo de la máquina de ensayo, asegurándose que la distancia entre el bloque de apoyo y el extremo de la viga sea como mínimo 25 mm. Como se obtuvo un contacto completo entre la viga y la barra de aplicación de carga, no fue necesario refrentar el espécimen. Posteriormente, la viga fue cargada continuamente y sin impactos a una velocidad constante hasta el punto de rotura.

Las dimensiones de los especímenes prismáticos fueron de 50 cm de largo x 15 cm de ancho y 15 cm de alto. Las dimensiones de la sección transversal utilizadas en el cálculo del módulo de rotura fueron tomadas a través de una de las caras fracturadas después de la prueba. Se tomaron tres medidas a lo largo de cada dimensión para determinar los promedios.

3.6.3. Etapa de gabinete

En esta sección se detalla el procedimiento del diseño de mezcla del concreto de control y del concreto reemplazando el agregado natural por el agregado reciclado de los porcentajes de reemplazo establecidos en la investigación usando el método del Módulo

de Finura de la Combinación de Agregados (en adelante MFCA) recomendado por Rivva Lopez, 2014.

3.6.3.1. Diseño de mezcla del concreto de control

Por razones de simplicidad, se han tomado en cuenta las suposiciones indicadas en el cuadro 3.2 para el diseño de mezcla del concreto del presente estudio:

Cuadro 3.2 Suposiciones de diseño

Descripción	Suposición
Aire incorporado del concreto	No
Consistencia de la mezcla de concreto	Plástica
Condiciones de exposición del concreto	No está sometido a procesos de congelación y deshielo, ni debe ser de baja permeabilidad.
Factor para la resistencia promedio f_{cr}	1.20
Resistencia de diseño f'_c	$f'_c=250 \text{ kg/cm}^2$
Tamaño máximo nominal (TMN) del agregado grueso natural y reciclado	3/4"
Resistencia probable a compresión del concreto a los 28 días en relación al concreto endurecido a los 7 días	1.33
Características del cemento	
Tipo	Portland tipo I
Marca	Pacasmayo
Peso específico	3.12 g/cm^3

- ***Resistencia promedio, selección del asentamiento y volumen unitario de agua***

Se determinó la resistencia promedio requerida a partir de la resistencia de diseño f'_c . Se ha considerado un factor de seguridad de 1.2 ya que la mezcla tiene excelentes condiciones de elaboración y un exigente control de calidad en el laboratorio. Seguidamente, se eligió el asentamiento de acuerdo a la consistencia plástica de la mezcla del concreto. En este caso, el asentamiento está entre tres y cuatro pulgadas. Se seleccionó el volumen unitario de agua en l/m^3 utilizando la tabla elaborada por el Comité 211 del ACI (concreto sin aire incorporado). Los valores de la tabla son máximos y son utilizados para calcular el factor cemento en mezclas preliminares de prueba.

- ***Selección del contenido de aire y relación A/C***

Se seleccionó el contenido de aire atrapado para un TMN de 3/4" y la relación agua – cemento por resistencia utilizando las tablas confeccionadas por el comité 211 del ACI

y por un grupo de investigadores de la *National Ready Mixed Concrete Association* que relacionan la resistencia promedio, la relación A/C y el TMN en concretos sin aire incorporado. Considerando que el concreto no tiene condiciones especiales de exposición, los valores de la relación A/C por durabilidad no han sido considerados.

- ***Cálculo del factor cemento y volumen absoluto de la pasta***

Utilizando los valores del volumen de agua y la relación A/C se calculó el contenido de cemento en kilos por unidad cúbica de concreto mediante la división unitaria del agua y la relación A/C. Posteriormente, se calculó el volumen absoluto de la pasta del concreto para luego determinar la cantidad de agregado total.

- ***Proporcionamiento del agregado***

El valor obtenido de la ecuación 2.30 porcentaje de agregado fino fue multiplicado por el volumen absoluto del agregado para calcular el volumen absoluto del agregado fino. Por diferencia, se determinó el volumen absoluto del agregado grueso.

Cabe resaltar que se ha escogido la metodología MFCA sobre la del Comité 211 del ACI ya que esta última se considera limitativa porque solamente se puede utilizar con agregado de granulometría, tamaño y perfil comparables, pero cuando se trata de diferentes tipos de agregados, el empleo de un porcentaje fijo de agregado grueso da inmediatamente lugar a diferencias en los requisitos de mortero, originadas principalmente por el contenido de vacíos del agregado grueso. Es así que el método MFCA es especialmente útil en la presente investigación ya que se requiere utilizar agregados con características granulométricas diferentes.

Asimismo, es importante mencionar que los valores de la tabla 16.3.10 están referidos a agregados gruesos de perfil angular, adecuadamente graduados con un contenido de vacíos del orden del 35%. Para este caso, los valores indicados en la tabla fueron disminuidos en 0.1 por cada 5% de incremento en el porcentaje de vacíos. Posteriormente, se calculan los pesos secos de los agregados al multiplicar los volúmenes absolutos por las densidades relativas y la densidad del agua (1000), los mismo que junto al factor cemento y el volumen unitario de agua son considerados los valores de diseño.

- ***Ajustes por humedad del agregado***

Finalmente, las cantidades de agregado fueron ajustadas considerando los valores de humedad y absorción de los mismos. Se determinó la humedad superficial de los

agregados la cual está dada por la diferencia entre el contenido de humedad y la absorción. De ser positivo, el agregado aporta agua a la mezcla y dicha cantidad debió ser disminuida del agua de diseño para determinar el agua efectiva; de lo contrario, el agregado tomará agua de la mezcla para llegar al estado de saturado superficialmente seco, debiendo agregar dicha agua a la mezcla para no modificar el agua de diseño.

- ***Proporción en peso y peso por tanda***

La proporción en peso de los materiales corregidos por humedad se realiza al dividir los pesos de los materiales por la cantidad de cemento y el agua (l/bls) se obtiene al dividir el agua efectiva por el factor cemento en bls/m³. Posteriormente se calcula las cantidades de materiales por tanda necesaria, ya sea de una bolsa de cemento, volumen de 3 testigos cilíndricos (0.02 m³) o 3 testigos prismáticos (0.04 m³) de concreto.

- ***Ajuste de proporciones de diseño por agua adicional, asentamiento, contenido de aire, apariencia y resistencia***

El ajuste de proporciones de los materiales del concreto se realiza mediante la elaboración de mezclas de prueba en laboratorio para un volumen de 0.02 m³, de acuerdo a los procedimientos indicados en capítulos anteriores. Se evaluó la apariencia de la mezcla, el asentamiento y agua adicional de ser necesaria. Se determinó la densidad del concreto fresco siguiendo los procedimientos de la Norma NTP 339.046, 2008, utilizando el recipiente utilizado para calcular el contenido de aire mediante el método de presión según la Norma NTP 339.083, 2003. Además, se midió la temperatura del concreto fresco siguiendo el procedimiento de la Norma NTP 339.184, 2002 y el asentamiento de acuerdo a la Norma NTP 339.035, 2009.

Seguidamente, se calcula el rendimiento de la tanda de ensayo en m³ y la nueva cantidad de agua de mezclado. Se corrige el agua de mezclado por asentamiento (aumentar 2 litros por cada incremento de 1 cm en el asentamiento) y por contenido de aire (reducir o incrementar 3 l/m³ por cada 1% del contenido de aire que se incrementa o disminuye). Se determinó el nuevo contenido de cemento y el nuevo volumen absoluto de pasta y del agregado.

Por apariencia, el agregado grueso fue corregido ya que la mezcla fue ligeramente sobregravosa, aumentando la cantidad de agregado fino en 2% para mejorar la trabajabilidad. Es importante recordar que una mayor proporción de agregado fino aumenta la cohesividad en los casos donde la relación a/c es alta y la textura de las

partículas del agregado es rugosa. Proporciones mas altas de agregado fino aumenta la riqueza de la mezcla, proporciona adecuada protección contra la segregación y facilita la trabajabilidad evitando una pobre compactación y aparición de cangrejeras.

Finalmente, se realiza el ajuste de las proporciones de diseño por resistencia de los especímenes a los 7 días de endurecimiento. Se calculó la resistencia probable a los 28 días suponiendo que esta resistencia debe estar en una relación de 1.33 con la resistencia a los 7 días.

3.6.3.2. Diseño de mezcla del concreto con ACR

Conocidas las proporciones ajustadas mediante el procedimiento descrito líneas arriba, se diseñaron las mezclas de concreto reemplazando el agregado natural por agregado reciclado al 20%, 30%, 40%, 50% y 100%. Se consideró que el volumen absoluto de la pasta es el mismo que el del concreto de control, variando solamente las proporciones de los agregados naturales y reciclados.

El cálculo del módulo de fineza de la combinación de agregados (M_{fca}) fue corregido por vacíos. Debido que se trata de materiales con características diferentes, los factores de corrección fueron afectados por los vacíos de los agregados gruesos natural y reciclado compactados y por el porcentaje de reemplazo (PR) correspondiente. El factor de corrección total corresponde a la suma de los factores de corrección calculados para cada agregado.

Posteriormente, los porcentajes de agregado fino natural y reciclado fueron calculados reemplazando el M_{fca} , ls módulos de finura correspondientes a los agregados en la fórmula (3.23) afectados por los PR. Se calcularon los volúmenes absolutos y los pesos secos de los agregados, los mismos que determinan los valores de diseño en estado seco. Finalmente, siguiendo el procedimiento descrito en acápite anteriores, se ajustaron los pesos de los agregados por humedad, se determinaron las proporciones en peso y se calcularon las cantidades de los materiales para tandas de 0.02 m^3 y 0.04 m^3 de concreto.

3.7. Tratamiento y análisis de datos y presentación de resultados

El procedimiento para la evaluación de los resultados de resistencia a compresión y tracción por flexión del concreto fue realizado utilizando la guía de evaluación del Comité 214 del Instituto Americano del Concreto (ACI), 2011. Se asume que los resultados del concreto se ajustan a una distribución normal. Además, se considera que

los resultados de los ensayos de resistencia varían inevitablemente independientemente de las condiciones de la elaboración y curado del concreto. Las variaciones pueden originarse de dos fuentes: (1) variaciones de tanda a tanda, donde las proporciones de los ingredientes, la relación a/c, mezcla, transporte, consolidación y curado pueden ser diferentes. (2) variaciones dentro de la tanda, que pueden ser la muestra de la tanda, preparación del espécimen, curado y procedimientos del ensayo.

El resultado de un ensayo de resistencia es el promedio de resistencia de todos los especímenes de la misma edad fabricados de la muestra tomada de una tanda de concreto. El análisis estadístico descriptivo se realizó utilizando el *software* Minitab 18. Se comprobó que los resultados de los ensayos de resistencia se ajusten a una distribución normal por medio de la prueba de normalidad que consiste en plotear los resultados de las resistencias individuales que tengan las mismas propiedades y verificar el valor de probabilidad p . Los datos tendrán una distribución normal cuando el valor p sea ≥ 0.01 . Se calculó la media \bar{X} , la desviación estándar de la muestra (s) y el coeficiente de variación V . El estudio no incluye un análisis de variaciones de muestras dentro de las tandas ni de muestras de tanda a tanda debido a que son muy pocos los especímenes con las mismas características.

Por otro lado, no se recomienda rechazar arbitrariamente los resultados de resistencia que parezcan estar muy lejos de la línea promedio porque la distribución normal anticipa la posibilidad de dichos resultados. El Comité 214 del ACI, 2011 indica que el descartar los resultados indiscriminadamente puede seriamente distorsionar la distribución de la resistencia, haciendo el análisis de los resultados desconfiable. Ocasionalmente, la resistencia de un cilindro de un grupo hecho de una muestra se desvía de los otros resultados que puede considerarse muy improbable. Si durante la elaboración, curado o ensayo de un espécimen de concreto existen variaciones cuestionables, ese único espécimen puede ser rechazado (ACI Committee 214, 2011, pág. 11).

CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El presente capítulo consta de cuatro partes: la presentación de resultados; el análisis, interpretación y discusión de resultados; la contrastación de hipótesis; y la evaluación económica de la investigación.

4.1. Presentación de resultados

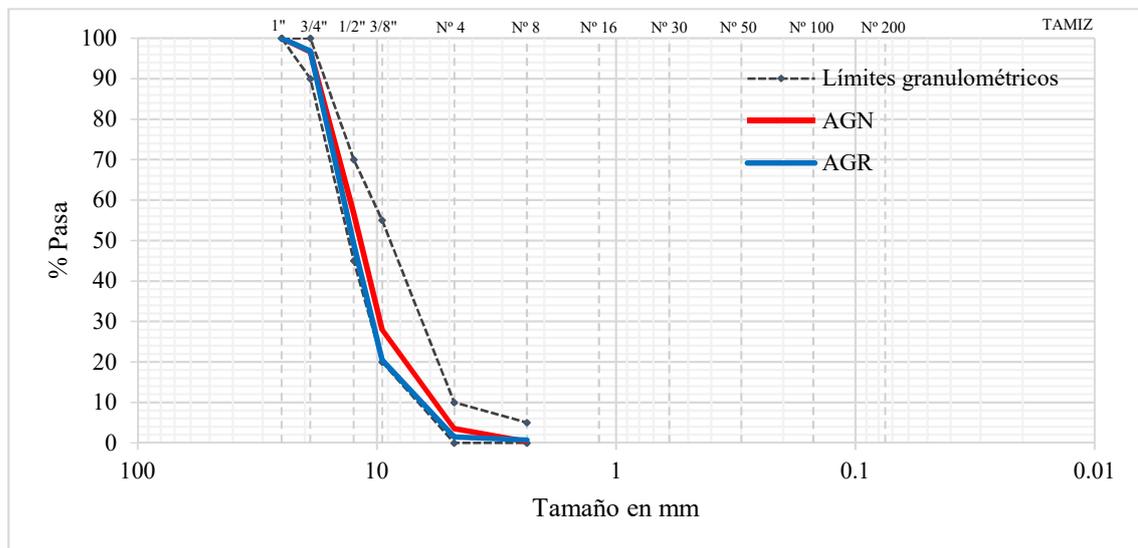
En este subcapítulo se presentan los resultados de los ensayos físico mecánicos de los agregados naturales y reciclados. Además, se muestran los resultados de los diseños de mezcla y los ensayos del concreto fresco y endurecido a los 7, 14 y 28 días. Los resultados mostrados corresponden al promedio de tres ensayos consecutivos del mismo tipo.

4.1.1. Propiedades físico-mecánicas de los agregados

4.1.1.1. Análisis granulométrico de los agregados gruesos

La figura 4.1 ilustra las curvas granulométricas del agregado grueso natural (AGN) y del agregado grueso reciclado (AGR), así como los límites granulométricos del huso 67 establecidos en la Norma NTP 400.037, 2014.

Figura 4.1 Curvas granulométricas de los agregados gruesos



El AGN fue inicialmente lavado antes de realizar el análisis granulométrico, eliminando así la mayor cantidad de finos adheridos a las partículas. El cuadro 4.1 presenta el promedio del análisis granulométrico del agregado grueso natural. La cantidad de material utilizado fue de 8280 g en promedio y el módulo de fineza promedio es 6.7.

Cuadro 4.1 Análisis granulométrico promedio del AGN

Tamiz		% Pasa promedio
N°	Abertura	
1"	25.00 mm	100.0
3/4"	19.00 mm	96.6
1/2"	12.50 mm	56.7
3/8"	9.50 mm	27.9
N° 4	4.75 mm	3.5
N° 8	2.36 mm	0.3
N° 16	1.18 mm	0.3
N° 30	600 μm	0.3
N° 50	300 μm	0.3
N° 100	150 μm	0.3
N° 200	75 μm	0.1
Cazoleta		0.1

El cuadro 4.2 resume el promedio de tres ensayos consecutivos del agregado grueso reciclado. Para el ensayo se utilizó una muestra de 8090 g de material en promedio con un módulo de fineza de 6.78. Es importante resaltar que para el análisis del material menor a 75 μm (malla N° 200) se utilizó una muestra adicional.

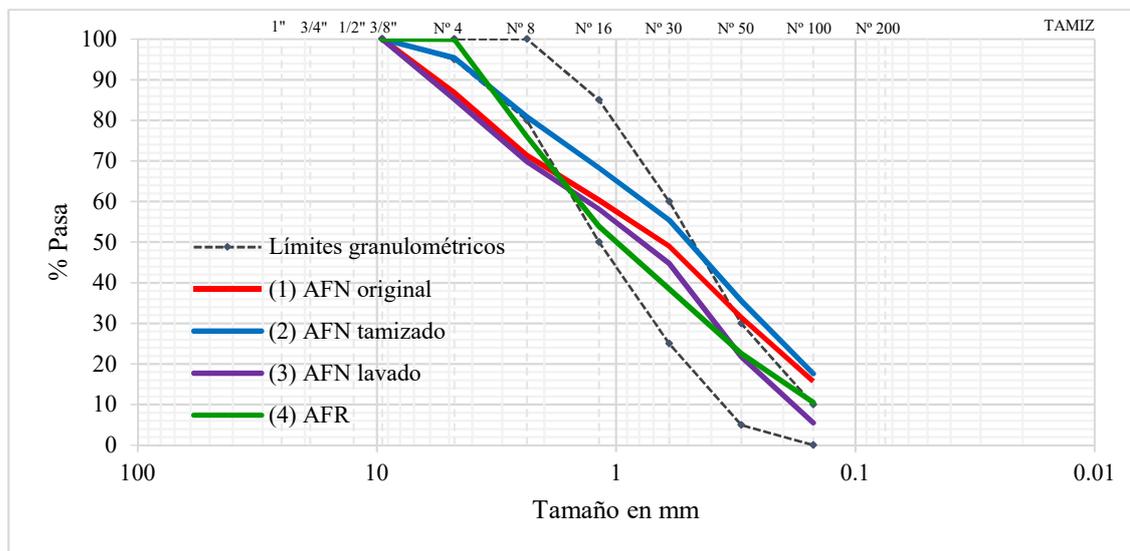
Cuadro 4.2 Análisis granulométrico promedio del AGR

Tamiz		% Pasa promedio
N°	Abertura	
1"	25.00 mm	100.0
3/4"	19.00 mm	96.9
1/2"	12.50 mm	49.1
3/8"	9.50 mm	20.5
N° 4	4.75 mm	1.4
N° 8	2.36 mm	0.7
N° 16	1.18 mm	0.7
N° 30	600 μm	0.7
N° 50	300 μm	0.7
N° 100	150 μm	0.7
N° 200	75 μm	0.3
Cazoleta		0.2

4.1.1.2. Análisis granulométrico de los agregados finos

En la figura 4.2, se pueden observar las curvas granulométricas de los agregados finos natural y reciclado, así como los límites granulométricos indicados en la Norma NTP 400.037, 2014.

Figura 4.2 Curvas granulométricas de los agregados finos



Cuadro 4.3 Análisis granulométrico promedio del AFN original de cantera (1)

Tamiz		% Pasa promedio
Nº	Abertura	
1"	25.00 mm	100.0
3/4"	19.00 mm	100.0
1/2"	12.50 mm	100.0
3/8"	9.50 mm	100.0
Nº 4	4.75 mm	86.9
Nº 8	2.36 mm	71.3
Nº 16	1.18 mm	60.4
Nº 30	600 μm	49.0
Nº 50	300 μm	31.5
Nº 100	150 μm	15.7
Nº 200	75 μm	8.9
Cazoleta		0.0

El cuadro 4.4 muestra el análisis granulométrico del agregado (2) (curva azul del gráfico 4.2). Se utilizó una muestra promedio de 430 g (muestra utilizada para la cantidad de finos (<75 μm)). Su módulo de fineza es en promedio 2.47.

Cuadro 4.4 Análisis granulométrico promedio del AFN tamizado (2)

Tamiz		% Pasa promedio
Nº	Abertura	
1"	25.00 mm	100.0
3/4"	19.00 mm	100.0
1/2"	12.50 mm	100.0
3/8"	9.50 mm	100.0
Nº 4	4.75 mm	95.4
Nº 8	2.36 mm	80.9
Nº 16	1.18 mm	68.2
Nº 30	600 μm	55.5
Nº 50	300 μm	35.5
Nº 100	150 μm	17.6
Nº 200	75 μm	9.7
Cazoleta		-0.1

El cuadro 4.5 ilustra los resultados del promedio de tres ensayos consecutivos del agregado fino natural (3) lavado (curva morada del gráfico 4.2).

Cuadro 4.5 Análisis granulométrico promedio del AFN lavado (3)

Tamiz		% Pasa promedio
Nº	Abertura	
1"	25.00 mm	100.0
3/4"	19.00 mm	100.0
1/2"	12.50 mm	100.0
3/8"	9.50 mm	100.0
Nº 4	4.75 mm	85.3
Nº 8	2.36 mm	69.9
Nº 16	1.18 mm	58.2
Nº 30	600 μ m	44.8
Nº 50	300 μ m	21.8
Nº 100	150 μ m	5.5
Nº 200	75 μ m	0.9
	Cazoleta	-0.2

En promedio, se utilizó una muestra de 315 g para el ensayo, la misma que sirvió para determinar la cantidad de agregado menor a 75 μ m mediante lavado. Su módulo de finura es 3.15.

El cuadro 4.6 muestra los resultados del análisis granulométrico del AFR. Se utilizó una muestra de 650 g en promedio y el módulo de fineza promedio del AFR es 2.99.

Cuadro 4.6 Análisis granulométrico promedio del AFR

Tamiz		% Pasa promedio
Nº	Abertura	
1"	25.00 mm	100.0
3/4"	19.00 mm	100.0
1/2"	12.50 mm	100.0
3/8"	9.50 mm	100.0
Nº 4	4.75 mm	99.9
Nº 8	2.36 mm	76.0
Nº 16	1.18 mm	53.9
Nº 30	600 μ m	38.5
Nº 50	300 μ m	22.6
Nº 100	150 μ m	10.6
Nº 200	75 μ m	6.4
	Cazoleta	0.2

4.1.1.3. Densidad promedio de partículas (sin orificios entre partículas), densidad relativa (peso específico) y absorción

El promedio de los resultados de las densidades de partículas (sin orificio entre partículas), densidades relativas y absorción de los agregados naturales y reciclados se presentan en el cuadro 4.7.

Cuadro 4.7 Resumen de densidades promedio de partículas, densidades relativas y absorción de los agregados naturales y reciclados

Descripción	AGN	AGR	AFN	AFR
Densidad (SH), kg/m ³	2640	2310	2620	2280
Densidad (SSS), kg/m ³	2660	2430	2660	2430
Densidad aparente, kg/m ³	2700	2620	2720	2680
Densidad relativa (SH)	2.64	2.31	2.62	2.28
Densidad relativa (SSS)	2.66	2.43	2.66	2.43
Densidad relativa aparente	2.70	2.62	2.72	2.68
Absorción, %	0.9	5.1	1.4	6.0

4.1.1.4. Densidad de masa y vacíos

El cuadro 4.8 resume las densidades de masa (peso unitario) y los vacíos entre partículas de los agregados naturales y reciclados en condición suelto y compactado. Los resultados de las densidades de masa se reportan con exactitud de 10 kg/m³ y el contenido de vacíos, con exactitud de 1%.

Cuadro 4.8 Densidad de masa y vacíos de los agregados naturales y reciclados

Descripción	AGN	AGR	AFN	AFR
Densidad de masa suelto, kg/m ³	1440	1190	1510	1290
Densidad de masa por apisonado, kg/m ³	1550	1290	1670	1380
Vacíos en el agregado suelto, %	45	49	42	43
Vacíos en el agregado compactado por apisonado, %	41	44	36	39

4.1.1.5. Resistencia a la abrasión del agregado

El cuadro 4.9 presenta los resultados del ensayo de resistencia a la degradación usando la máquina de Los Ángeles para los agregados gruesos y están aproximados al 1% de la masa.

Cuadro 4.9 Resistencia a la abrasión del agregado grueso natural y reciclado

Descripción	AGN	AGR
Tamaño máximo nominal	3/4"	3/4"
Gradación utilizada	B	B
Pérdida por abrasión Los Ángeles, %	28	44

4.1.1.6. Material más fino que pasa por el tamiz de 75 µm (N° 200)

El cuadro 4.10 muestra los resultados del material más fino que el tamiz de 75 µm de los agregados naturales y reciclados, a excepción del AGN debido a que el agregado fue lavado antes de realizar el análisis granulométrico. En el caso del AGR, se utilizó una muestra adicional para realizar el ensayo.

Cuadro 4.10 Material más fino que el tamiz de 75 µm (N° 200)

Agregado	Material < 75 µm (N° 200), %	
	Ensayo por lavado	Después de granulometría
AGN	-	0.1
AGR	1.1	0.3
(1) AFN original	8.7	8.9
(2) AFN tamizado (N° 4)	9.4	9.7
(3) AFN lavado	-	0.9
(4) AFR	6.0	6.4

Asimismo, los ensayos correspondientes a los agregados finos natural y reciclado fueron ensayados antes de realizar el análisis granulométrico.

4.1.1.7. Contenido de humedad

El cuadro 4.10 presenta los resultados del contenido de humedad de los agregados naturales y reciclados tanto en su estado natural como en el día de la fabricación del concreto.

Cuadro 4.10 Contenido de humedad, %

Descripción	Mezcla	AGN	AGR	AFN	AFR
Estado natural	-	0.2	0.6	5.7	5.6
Tanda 1 (ensayos de prueba)	DM-A	0.5	-	3.7	-
Tanda 2	DM-0	1.2	-	9.6	-
Tandas 3 y 4	DM-0	1.2	-	8.4	-
Tandas 5 y 6	DM-50	1.0	5.8	9.5	11.2
Tandas 7, 8 y 9	DM-40 y DM-30	1.2	5.4	5.4	12.4
Tandas 10, 11 y 12	DM-30 y DM-20	1.0	5.5	9.5	10.5
Tandas 13, 14, 15 y 16	DM-50, DM-30, DM-20 y DM-0	1.0	5.6	9.5	11.2
Tandas 17, 18, 19 y 20	DM-40, DM-100 y DM-0	1.2	6.0	9.5	11.5
Tandas 21 y 22	DM-20	0.8	4.0	7.5	9.0

4.1.2. Diseños de mezcla

El proporcionamiento de los materiales en estado seco del concreto elaborado en esta investigación son presentados en el cuadro 4.11. El procedimiento detallado del diseño de mezcla de todos los concretos están adjuntos en el Anexo B. Las proporciones de la mezcla DM-A corresponden al diseño inicial, el mismo que fue utilizado para elaborar el concreto de prueba. Posteriormente, se utilizó el (3) AFN lavado para el resto de especímenes.

Cuadro 4.11 Diseños de mezcla

Mezcla	PR, %	A/C	Agua, l/m ³	Cemento		Agregado en estado seco, kg/m ³			
				kg/m ³	bls/m ³	AGN	AGR	AFN	AFR
DM-A	0	0.55	205	373	8.8	1057	-	669	-
DM-0	0	0.65	222	341	8.0	889	-	818	-
DM-20	20	0.65	222	341	8.0	707	158	661	141
DM-30	30	0.65	222	341	8.0	616	236	580	212
DM-40	40	0.65	222	341	8.0	527	313	499	284
DM-50	50	0.65	222	341	8.0	438	390	417	356
DM-100	100	0.65	222	341	8.0	-	768	-	723

4.1.3. Concreto fresco

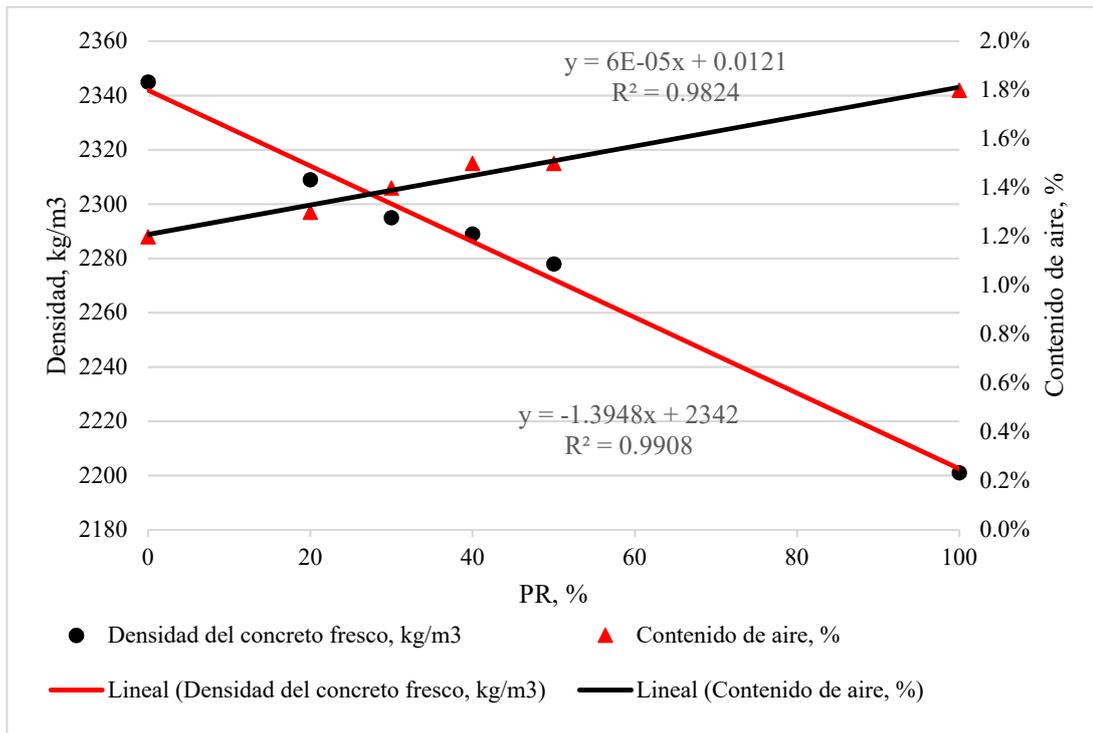
El cuadro 4.12 ilustra los resultados de las propiedades del concreto fresco por tanda y porcentaje de reemplazo (PR). El contenido de aire y densidad del concreto fresco fueron determinados utilizando el medidor de aire tipo B. Estos parámetros fueron determinados solamente en una de las tandas por tipo de concreto.

Cuadro 4.12 Propiedades del concreto fresco

Tanda	PR, %	Temperatura, °C	Contenido de aire, %	Asentamiento, pulg	Densidad, kg/m ³
1	0	20.6	-	3 ½	-
2	0	20.7	-	3 ½	-
3	0	20.0	-	3 ½	-
4	0	19.8	-	4	-
5	50	20.9	-	3 ½	-
6	50	20.6	1.5	3 ½	2278
7	40	20.2	-	3	-
8	40	20.4	1.5	3 ¼	2289
9	30	20.5	-	3 ¼	-
10	30	20.0	1.4	4	2295
11	20	20.2	1.3	3 ¼	2309
12	20	20.4	-	3 ¼	-
13	50	20.6	-	4	-
14	30	20.9	-	3 ¼	-
15	20	20.4	-	3 ¼	-
16	0	20.5	1.2	3 ½	2345
17	40	20.0	-	3 ¼	-
18	100	20.5	1.8	3 ¼	2201
19	0	21.0	-	3 ½	-
20	0	21.0	-	3 ½	-
21	20	20.0	-	3 ½	-
22	20	20.0	-	3 ½	-

La figura 4.3 muestra las curvas de tendencia lineal de la densidad y el contenido de aire del concreto fresco.

Figura 4.3 Densidad y contenido de aire del concreto fresco vs. PR, %



4.1.4. Concreto endurecido

En este acápite se presentan los resultados de los ensayos del concreto endurecido: ensayos de resistencia a compresión y flexión.

4.1.4.1. Resistencia a la compresión

4.1.4.1.1. Resultados del concreto de control

El cuadro 4.13 resume los resultados de los ensayos de resistencia a compresión individuales del concreto de control a la edad de 7, 14 y 28 días, así como el promedio \bar{X} , la desviación estándar s , y el coeficiente de variación V para cada edad del concreto.

Cuadro 4.13 Resistencia a compresión, desviación estándar y varianza – concreto de control

ID	Edad, d	X_i , kg/cm ²	\bar{X} , kg/cm ²	S , kg/cm ²	V , %
M1	7	228	230	9	3.9%
M2	7	220			
M3	7	223			
M9	7	244			
M14	7	237			
M15	7	230			

Cuadro 4.13 Resistencia a compresión, desviación estándar y varianza – concreto de control

ID	Edad, d	X_i, kg/cm²	\bar{X}, kg/cm²	S, kg/cm²	V, %
M6	14	294			
M7	14	285			
M8	14	299			
M12	14	301	289	23	8.1%
M13	14	244			
M86	14	309			
M4	29	358			
M5	29	338			
M10	29	338			
M11	29	340	348	10	2.9%
M84	28	360			
M85	28	352			

4.1.4.1.2. Resultados del concreto con PR del 20%

En el cuadro 4.14, se resumen los resultados de los ensayos de resistencia a compresión individuales del concreto con un PR de 20% a la edad de 7, 14 y 28 días.

Cuadro 4.14 Resistencia a compresión, desviación estándar y varianza – PR 20%

ID	Edad, d	X_i, kg/cm²	\bar{X}, kg/cm²	S, kg/cm²	V, %
M58	7	220			
M59	7	217			
M64	7	206			
M65	7	159	210	26	12.5%
M82	7	226			
M83	7	230			
M56	14	269			
M57	14	269			
M61	14	274			
M63	14	271	277	11	3.9%
M80	14	286			
M81	14	295			

**Cuadro 4.14 Resistencia a compresión, desviación estándar y
varianza – PR 20%**

ID	Edad, d	X_i, kg/cm²	\bar{X}, kg/cm²	S, kg/cm²	V, %
M54	28	327			
M55	28	316			
M60	28	297	313	12	3.8%
M62	28	303			
M78	28	325			
M79	28	309			

4.1.4.1.3. Resultados del concreto con PR del 30%

El cuadro 4.15 presenta los resultados individuales de resistencia a compresión y las propiedades estadísticas del concreto con un PR de 30%.

**Cuadro 4.15 Resistencia a compresión, desviación
estándar y varianza – PR 30%**

ID	Edad, d	X_i, kg/cm²	\bar{X}, kg/cm²	S, kg/cm²	V, %
M45	7	201			
M50	7	210			
M51	7	215	211	7	3.3%
M53	7	205			
M76	7	214			
M77	7	220			
M44	14	252			
M48	14	266			
M49	14	261	266	9	3.2%
M52	14	276			
M74	14	272			
M75	14	269			
M42	28	307			
M43	28	276			
M46	28	305	306	16	5.2%
M47	28	306			
M72	28	319			
M73	28	320			

4.1.4.1.4. Resultados del concreto con PR del 40%

El 4.16 resume los resultados del ensayo de resistencia a compresión del concreto con PR de 40%. El coeficiente de variación en todos los casos es menor que el máximo para resultados obtenidos en laboratorio del 5%.

Cuadro 4.16 Resistencia a compresión, desviación estándar y varianza – PR 40%

ID	Edad, d	X_i , kg/cm ²	\bar{X} , kg/cm ²	S, kg/cm ²	V, %
M32	7	212			
M33	7	210			
M35	7	218	208	8	4.1%
M40	7	205			
M41	7	193			
M90	7	209			
M30	14	281			
M31	14	278			
M38	14	263	266	11	4.2%
M39	14	252			
M88	14	266			
M89	14	258			
M28	28	305			
M29	28	297			
M34	28	292	294	12	4.0%
M36	28	274			
M37	28	288			
M87	28	305			

4.1.4.1.5. Resultados del concreto con PR del 50%

El cuadro 4.17 ilustra los resultados individuales del ensayo de resistencia a compresión del concreto con PR de 50%.

**Cuadro 4.17 Resistencia a compresión, desviación estándar y
varianza – PR 50%**

ID	Edad, d	X_i, kg/cm²	\bar{X}, kg/cm²	S, kg/cm²	V, %
M20	7	207			
M21	7	218			
M26	7	194	203	9	4.4%
M27	7	206			
M70	7	200			
M71	7	195			
M18	14	263			
M19	14	256			
M24	14	270	264	5	1.8%
M25	14	264			
M68	14	267			
M69	14	263			
M16	28	286			
M17	28	282			
M22	28	289	291	7	2.3%
M23	28	293			
M66	28	296			
M67	28	300			

4.1.4.1.6. Resultados del concreto con PR del 100%

Finalmente, los resultados individuales del ensayo de resistencia a compresión del concreto con PR de 100% a los 28 días se muestran en la tabla 4.18. El coeficiente de variación es del 2%.

**Cuadro 4.18 Resistencia a compresión, desviación estándar y
varianza – PR 100%**

ID	Edad, d	X_i, kg/cm²	\bar{X}, kg/cm²	S, kg/cm²	V, %
M91	28	291			
M92	28	281			
M93	28	279	283	6	2.0%
M94	28	278			
M95	28	290			
M96	28	280			

4.1.4.1.7. Resumen de los resultados del ensayo de resistencia a compresión

A continuación, se presenta un resumen de los resultados del ensayo de resistencia a compresión en la tabla 4.19.

Cuadro 4.19 Resultados de las resistencias a compresión, kg/cm²

Edad	Porcentaje de reemplazo, %					
	0	20	30	40	50	100
7	230	210	211	208	203	-
14	289	277	266	266	264	-
28	348	313	306	294	291	283

La figura 4.4 ilustra los resultados de resistencia a compresión del concreto ensayado a la edad de 7, 14 y 28 días y las densidades de los concretos con diferentes PR. Adicionalmente, el cuadro 4.20 muestra la reducción en porcentaje de la resistencia a compresión del concreto utilizando ACR en comparación con el concreto de control.

Cuadro 4.20 Reducción de la resistencia a compresión del concreto con ACR en relación al concreto de control, %

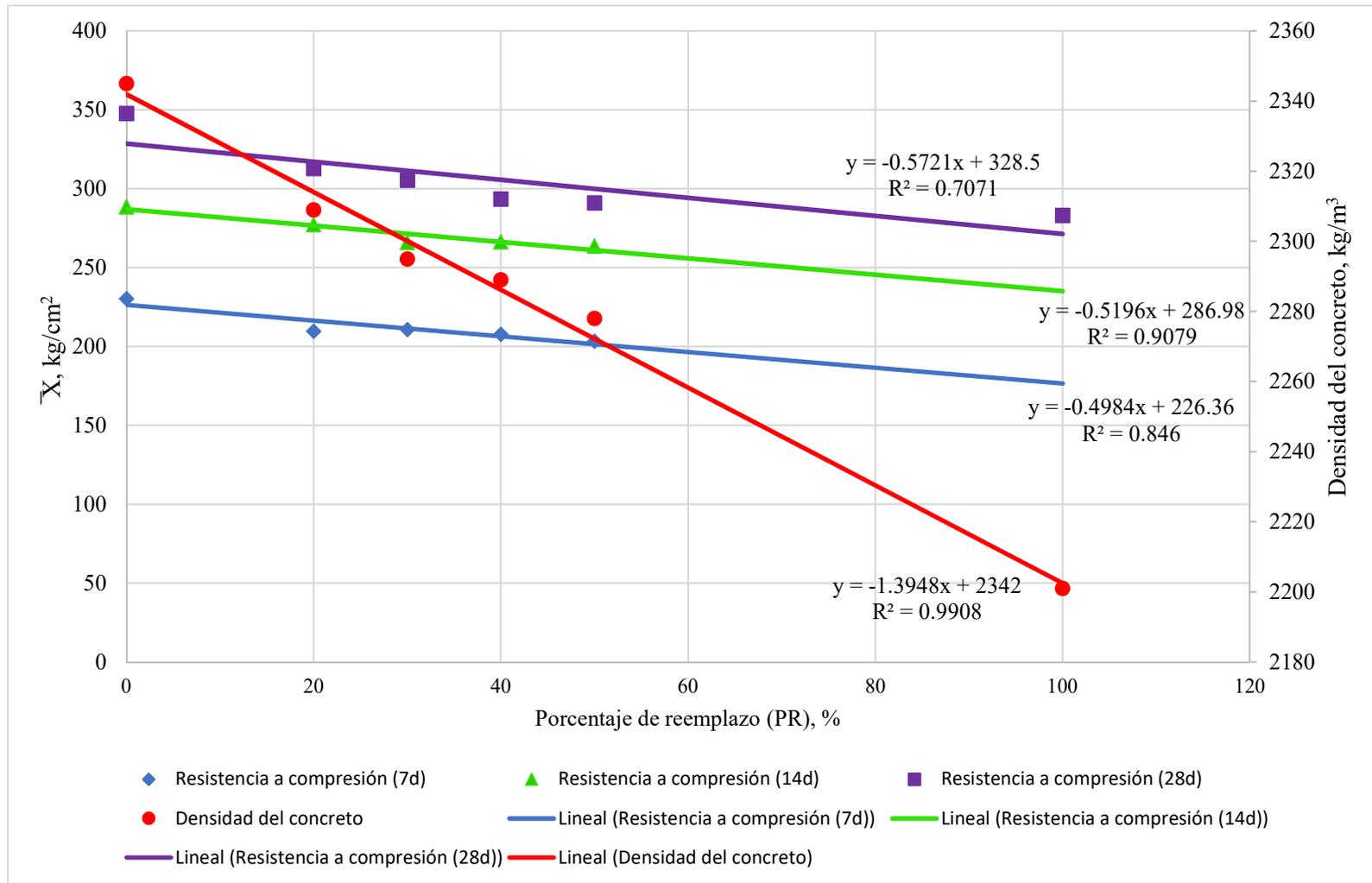
Edad	Porcentaje de reemplazo, PR					
	0	20	30	40	50	100
7	-	9%	8%	10%	12%	
14	-	4%	8%	8%	9%	
28	-	10%	12%	16%	16%	19%

El cuadro 4.21 muestra la relación en porcentaje de los resultados de las resistencias obtenidas en laboratorio con la resistencia de diseño f'_c y la resistencia promedio f'_{cr} .

Cuadro 4.21 Relación de las resistencias del concreto a los 28 días con el f'_c y el f'_{cr} , %

f'_c y f'_{cr}	Porcentaje de reemplazo, PR					
	0	20	30	40	50	100
250	28%	20%	18%	15%	14%	12%
300	14%	4%	2%	-2%	-3%	-6%

Figura 4.4 Resultados de resistencia a compresión y densidad vs. PR, %



Por otro lado, el cuadro 4.22, muestra el factor real entre las resistencias del concreto a los 14 y 28 días en relación al concreto a los 7 días de endurecimiento.

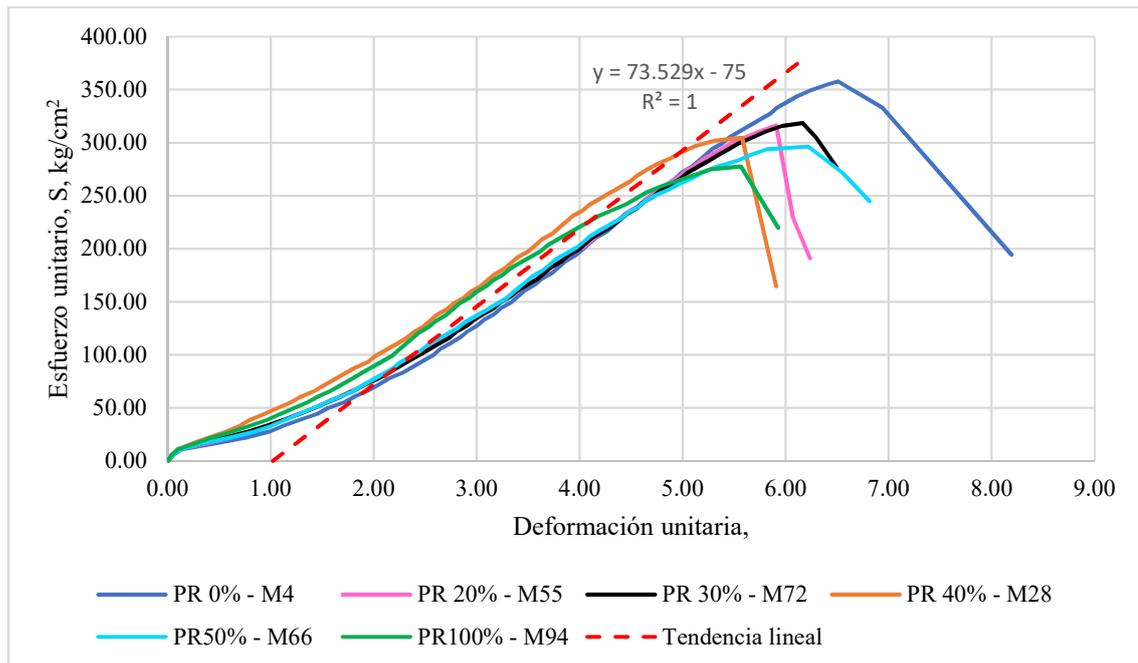
Cuadro 4.22 Factor de relación de las resistencias a los 14 y 28 días con las resistencias a los 7 días

Edad	Porcentaje de reemplazo, PR				
	0	20	30	40	50
7	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
14	1.25	1.32	1.26	1.28	1.30
28	1.51	1.49	1.45	1.41	1.43

4.1.4.1.8. Cálculo del módulo de elasticidad (E_c)

Las curvas de esfuerzo vs deformación unitaria de seis especímenes de concreto con diferentes PR ensayados a 28 días son presentadas en la figura 4.5.

Figura 4.5 Curvas de esfuerzo (S) vs deformación unitaria (ϵ)



Los módulos de elasticidad de estos seis especímenes fueron calculados de dos maneras: (1) mediante el módulo cuerda (E_c) utilizando la figura 4.5 y el procedimiento del estándar ASTM C 469, 1994 y (2) utilizando la ecuación 2.24 para concretos con densidad entre 1440 y 2560 kg/cm² proporcionada por el Comité 318M del ACI, 2014.

El cuadro 4.22 resume el cálculo de E_c utilizando el gráfico y el cuadro 4.23 muestra el cálculo de E_{c1} usando la ecuación del ACI.

Cuadro 4.22 Módulo de elasticidad (E_c) utilizando el gráfico, kg/cm^2

ID	PR, %	Edad, d	S, kg/cm^2	S_1 , kg/cm^2	S_2 (40%S), kg/cm^2	ϵ_1 , mm/mm	ϵ_2 , mm/mm	E_c , kg/cm^2
M4	0	28	358	6	143.2	0.00005	0.00323	43145
M55	20	28	316	5	126.4	0.00005	0.00287	43050
M72	30	28	319	6	127.6	0.00005	0.00290	42667
M28	40	28	305	5	122.0	0.00005	0.00240	49787
M66	50	28	296	5	118.4	0.00005	0.00269	42955
M94	100	28	278	5	111.2	0.00005	0.00232	46784

Cuadro 4.23 Módulo de elasticidad (E_{c1}) por ecuación del ACI, kg/cm^2

ID	PR, %	Edad, d	f'_c , kg/cm^2	E_{c1} , kg/cm^2
M4	0	28	250	251369
M55	20	28	250	245603
M72	30	28	250	243373
M28	40	28	250	242419
M66	50	28	250	240674
M94	100	28	250	228575

4.1.4.2. Resistencia a flexión

A continuación, se presentan los resultados de la resistencia a flexión de las mezclas de concreto en el cuadro 4.24.

Cuadro 4.24 Resultados del ensayo de resistencia a flexión – PR 0% y PR 20%

ID	Edad, d	X_i , kg/cm^2	M_r , kg/cm^2	S, kg/cm^2	V, %
M97	28	48.53			
M98	28	43.99			
M99	28	45.57	45	2	5.4%
M100	28	41.39			
M101	28	45.85			
M102	28	46.69			

**Cuadro 4.24 Resultados del ensayo de resistencia a flexión –
PR 0% y PR 20%**

ID	Edad, d	X_i , kg/cm ²	M_r , kg/cm ²	S , kg/cm ²	V , %
M103	28	41.32			
M104	28	42.82			
M105	28	38.22	40	2	3.8%
M106	28	40.11			
M107	28	40.17			
M108	28	39.89			

4.1.4.3. Correlación del módulo de rotura y la resistencia a compresión

El cuadro 4.25 ilustra el cálculo de la constante a para el concreto de control y para el concreto con PR de 20% utilizando la ecuación 2.29.

Cuadro 4.25 Cálculo de la constante a de la correlación del M_r y \bar{X}

PR	\bar{X} , kg/cm ²	M_r , kg/cm ²	Constante a
0	348	45	2.43
20	313	40	2.29

4.2. Análisis, interpretación y discusión de resultados

4.2.1. Propiedades físico-mecánicas de los agregados

4.2.1.1. Análisis granulométrico

Como se puede ver en la figura 4.1, el agregado grueso natural (AGN) y el agregado grueso reciclado (AGR) cumplen con los requisitos granulométricos del huso 67 establecidos en la Norma NTP 400.037, 2014 para ser utilizados en concreto. Este no es el caso de los agregados finos natural y reciclado que, de acuerdo la figura 4.2, no cumplen con las exigencias granulométricas de la Norma NTP 400.037, 2014.

Se puede observar en la figura 4.2 que el AFN original tiene un exceso de material retenido en el tamiz N° 4 que con la intención de forzar la curva granulométrica para que cumpla con los requisitos de norma, se retiró las $\frac{3}{4}$ partes del material retenido en la malla N° 4; sin embargo, la falta de material retenido en esta malla reduce la cantidad de agregado fino en el diseño de mezcla, afectando así la trabajabilidad del concreto. En este

sentido, el AFN tamizado fue mezclado con un material adicional con las mismas características del agregado original. Además, éste fue lavado para reducir la cantidad de material más fino que 75 μm .

A pesar que este último excedió el material retenido en la malla N° 4, el AFN lavado es aceptado para la elaboración del concreto de acuerdo al acápite 6.3 de dicha Norma que permite el uso del agregado que no cumple con las gradaciones especificadas de haber estudios que aseguren que el material produzca concreto de la resistencia requerida. De igual manera, el AFR fue tamizado por la malla N° 4 para eliminar el exceso de material retenido antes de realizar el ensayo; a pesar de ello, el AFR excede ligeramente la cantidad de finos pero también es aceptado para su uso en concreto.

4.2.1.2. Densidad y absorción

Del cuadro 4.7, se observa que los ACR son menos densos que los agregados naturales debido a su estructura porosa, producto de la pasta de cemento adherida a los granos originales. De acuerdo a lo descrito en el acápite 2.2.3.2.5, el ACR es un agregado de densidad normal por tener una densidad seca entre 2100 y 2400 kg/m^3 y una densidad saturada superficialmente seca entre 2300 y 2500 kg/m^3 , tanto para el agregado grueso como para el fino. Esta afirmación se refuerza con el hecho de que las densidades de masa sueltas del ACR grueso y fino son superiores a 1120 kg/m^3 . Un agregado liviano tendría una densidad de masa suelta por debajo de este valor.

Además, se observa que las densidades de ambos agregados son inversamente proporcionales a sus respectivas absorciones. La absorción del ACR es considerablemente mayor que la del agregado natural debido a la pasta adherida al agregado original. Esto significa que los ACR tienen un mayor volumen total de poros, que de acuerdo al ítem 2.2.2.3, los ACR son más propensos a sufrir ataques químicos que los agregados naturales debido a su mayor superficie específica. Asimismo, la porosidad afecta la resistencia de carga del ACR al tener una menor área neta de sólidos. Finalmente, la rugosidad y las características porosas de la superficie del ACR afectan también la textura superficial y la calidad de la adherencia de la nueva pasta de cemento.

4.2.1.3. Resistencia a la abrasión del agregado

Los resultados de pérdida por abrasión de ambos agregados cumplen con el límite permitido (no mayor del 50%) establecido en la Norma NTP 400.037, 2014 para ser

utilizados en concretos de pavimentos y estructuras de 280 kg/m² o más. Ambos valores están dentro de los rangos típicos encontrados en otras investigaciones.

La baja resistencia a la abrasión del ACR se explica al tener un enlace entre el cemento y el agregado más débil que la estructura interna del agregado grueso original debido posiblemente al deficiente control de calidad de la elaboración del concreto original. Se ha dicho, también, que la porosidad afecta la resistencia de los materiales más porosos y la resistencia a la abrasión del agregado.

4.2.1.4. Material más fino que pasa por el tamiz de 75 µm (N° 200)

A pesar que el AFR excede los valores máximos permitidos en la Norma NTP 400.037, 2014 en 1%, el AFR es aceptado considerando que el límite puede ser aumentado al rango de 5% a 7% en casos de arenas manufacturadas libres de arcilla o limos. No es el caso del AFN que tuvo que ser lavado antes de ser usado en la elaboración del concreto para reducir la cantidad de material más fino que el tamiz N° 200.

Es importante resaltar que a pesar que ambos agregados finos fueron lavados durante el proceso de trituración, los agregados contienen una porción significativa de material más fino que 75 micras. Se sabe que este material fino puede afectar la resistencia del concreto al impedir los enlaces entre la pasta y el agregado (adherencia reducida) al generar esfuerzos de tensión dentro de la masa de concreto y al aumento de agua y cemento para mantener su relación A/C.

Adicionalmente, se observa que los resultados del material más fino que 75 micras de los agregados finos calculados en el ensayo por lavado son ligeramente más bajos que los del análisis granulométrico debido a que se tiene que sumar una pequeña porción del orden de 1 g que todavía se encuentra durante el análisis.

4.2.2. Diseños de mezcla

El bajo módulo de finura del agregado fino natural utilizado en la mezcla de prueba (AFN tamizado) hace que la cantidad del agregado utilizado en la mezcla sea también más baja. Para compensar la cantidad de agregado fino y mejorar la trabajabilidad de la mezcla, se aumentó la cantidad de material retenido en la malla N° 4 del AFN para aumentar su módulo de finura y mejorar la trabajabilidad de la mezcla.

Con el nuevo AFN (3), se realizó un nuevo diseño de mezcla (DM-0) con nuevas proporciones después de hacer los ajustes necesarios en el laboratorio y reducir la cantidad de cemento por resistencia (Ley de Powers). Al reducir la cantidad de cemento, se aumentó la relación A/C para mantener la cantidad de agua necesaria en la mezcla y así obtener el asentamiento deseado. La mezcla DM-0 del cuadro 4.11 fue utilizada como base para realizar el cálculo de las proporciones incluyendo los agregados reciclados en la mezcla. El proporcionamiento de los materiales fue realizado por volúmenes absolutos para mantener el rendimiento del concreto.

4.2.3. Concreto fresco

Como se puede observar en la figura 4.3, la densidad es inversamente proporcional al contenido de aire del concreto fresco. Frecuentemente, las variaciones de la resistencia del concreto dependen de las variaciones del contenido de aire. El contenido de aire atrapado influencia los requerimientos de agua y la resistencia. Como se verá más adelante, además de la densidad, el contenido de aire tiene una relación inversa con la resistencia del concreto.

También se puede ver en el mismo gráfico que la densidad de todos los concretos elaborados en laboratorio oscila de 2200 kg/m³ a 2340 kg/m³, aproximadamente. De acuerdo a la Norma NTP 339.047, 2014, un concreto es considerado de peso normal cuando su densidad está alrededor de 2,400 kg/m³. Por lo tanto, el concreto elaborado con todos los PR es considerado como un concreto de peso normal.

4.2.4. Concreto endurecido

4.2.4.1. Resistencia a la compresión

4.2.4.1.1. Análisis del tipo de falla

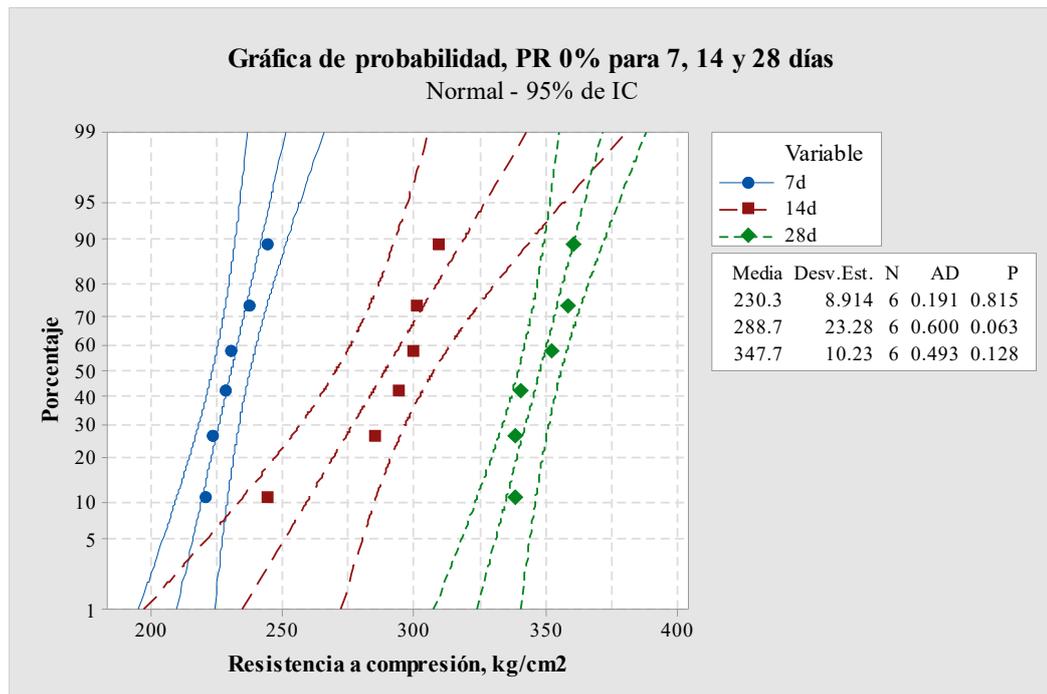
En general, los especímenes de concreto mostraron una fractura del tipo 1 donde los conos estuvieron razonablemente bien formados, aunque algunos casos mostraron fracturas del tipo 2, los que tuvieron fisuras verticales a través de los cabezales. Asimismo, hubo especímenes que mostraron fracturas del tipo 5 y 6.

4.2.4.1.2. Concreto de control

Utilizando el software Minitab 18, se realizó una prueba de normalidad (figura 4.6). En esta figura se observa que el valor de probabilidad p para las tres curvas es mayor

que 0.01, verificándose así que los datos se ajustan a una distribución normal. Además, los datos de las curvas para 7 y 28 días se ajustan a las líneas de normalidad. No es el caso de la curva de 14 días, donde se observa que un punto hace que la curva no se ajuste mejor a la línea de normalidad; a pesar de ello, la curva de 14 días sigue ajustándose a una distribución normal. Además, considerando que la información es escasa, no se justifica eliminar ese punto. A pesar que el coeficiente de variación para la curva de 14 días es de $8.1\% > 5\%$, el resultado es aceptado y utilizado en el análisis.

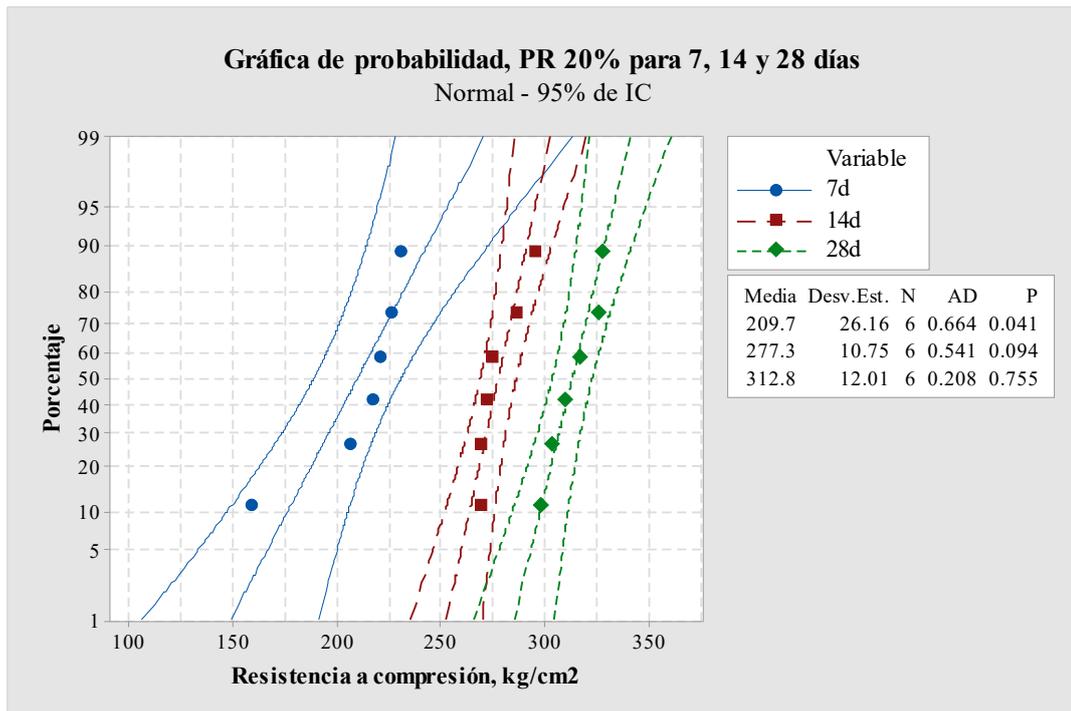
Figura 4.6 Prueba de normalidad - PR 0% para 7, 14 y 28 días



4.2.4.1.3. Concreto con PR del 20%

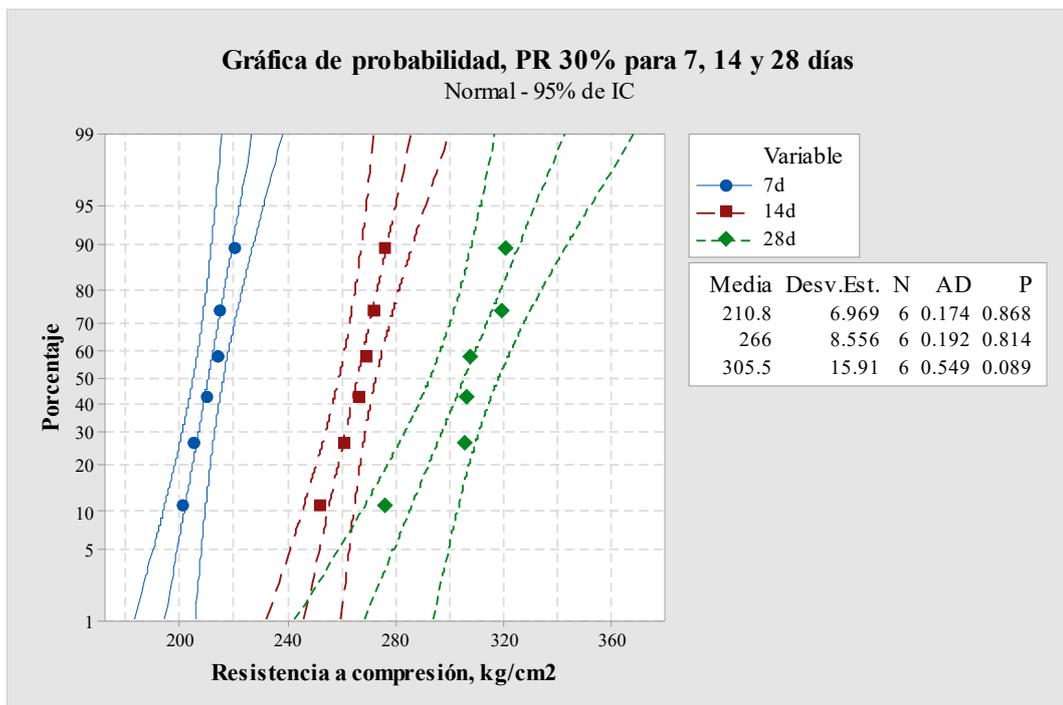
La prueba de normalidad de los resultados individuales del concreto con PR de 20% indica que las tres curvas se ajustan a una distribución normal. En la figura 4.7, se observa que uno de los puntos de la curva 7d se aleja de la línea de normalidad. A pesar de esto, el valor $p = 0.041$ es mayor que 0.01, indicador de una distribución normal. Se decide nuevamente no eliminar el punto a pesar que el valor V de los 7 días es 12.5%.

Figura 4.7 Prueba de normalidad - PR 20% para 7, 14 y 28 días



4.2.4.1.4. Concreto con PR del 30%

Gráfico 4.8 Prueba de normalidad - PR 30% para 7, 14 y 28 días



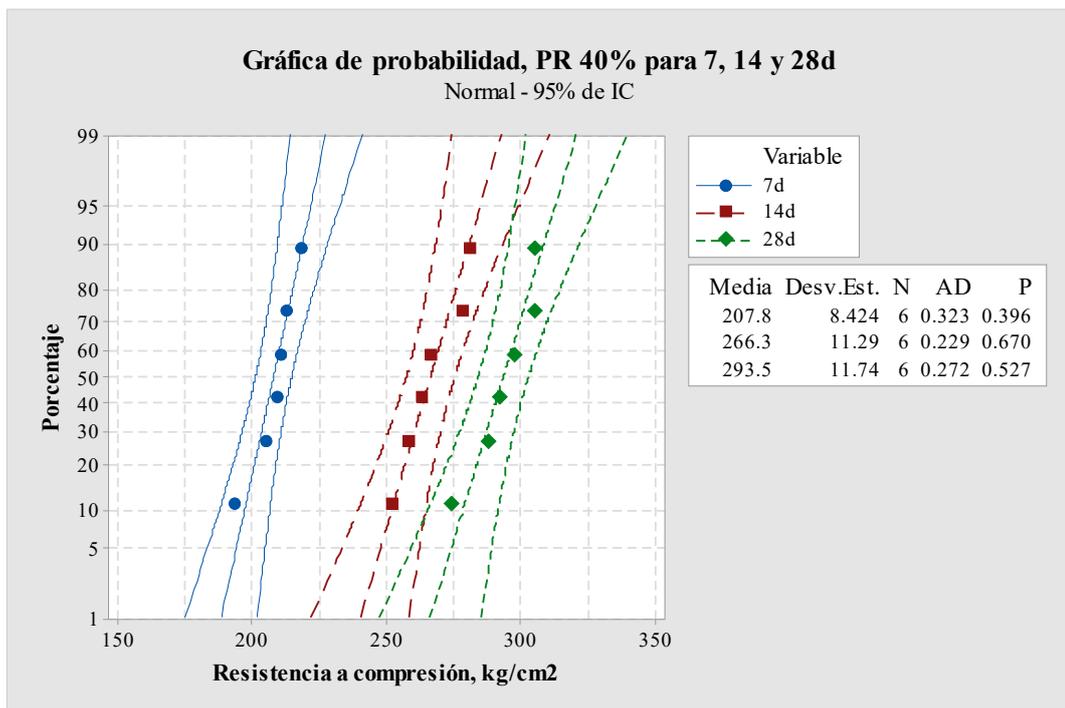
En este caso, se puede observar en la figura 4.8 que los valores se ajustan mucho mejor a la línea de normalidad de la figura 4.7. Las tres curvas se ajustan a una distribución normal ya que el valor de probabilidad p es mayor que 0.01. Por otro lado,

se observa que el coeficiente de variación de la curva de 28 días es 5.2%, valor ligeramente superior al máximo aceptable para resultados en laboratorio de 5%.

4.2.4.1.5. Concreto con PR del 40%

La figura 4.9 presenta los resultados de la prueba de normalidad utilizando el software Minitab 8 donde se observa que los resultados de las tres curvas se ajustan a una distribución normal mejor que los casos anteriores.

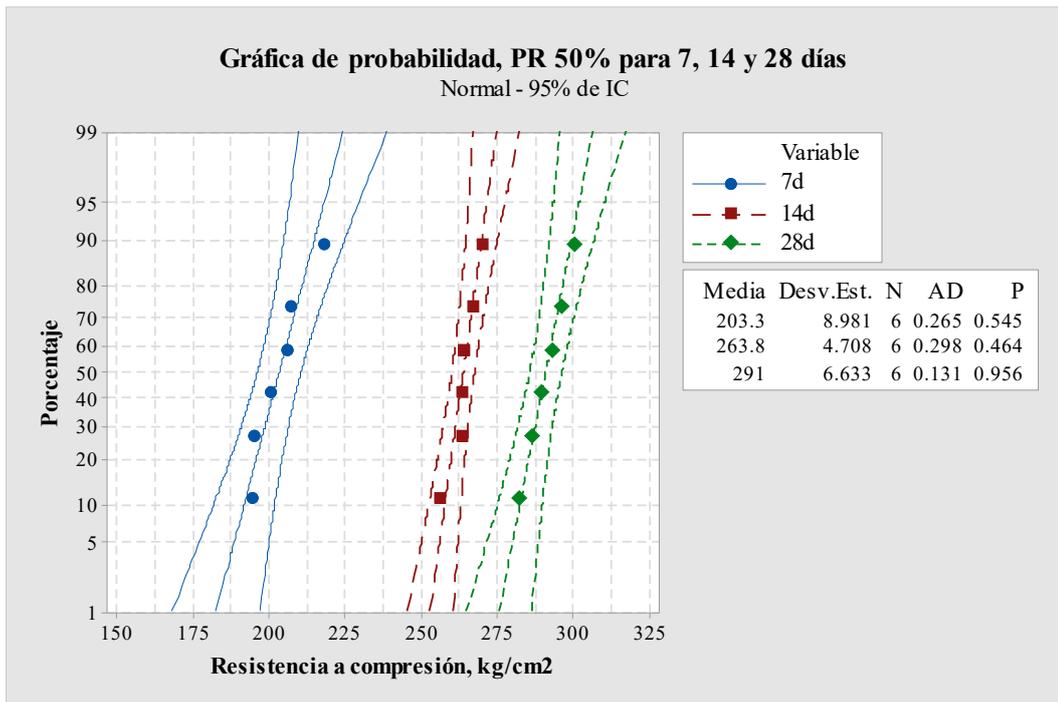
Figura 4.9 Prueba de normalidad - PR 40% para 7, 14 y 28 días



4.2.4.1.6. Concreto con PR del 50%

La figura 4.10 muestra los resultados de la prueba de normalidad. En este caso, las tres curvas se ajustan a una distribución normal debido que el valor de probabilidad p es mayor que 0.01.

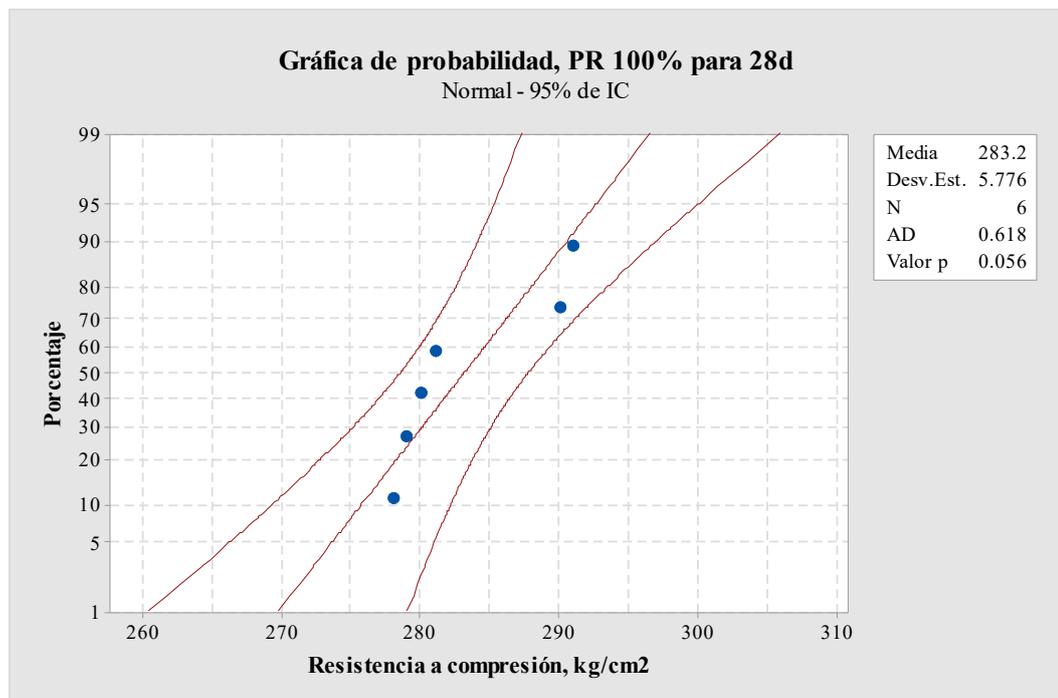
Figura 4.10 Prueba de normalidad - PR 50% para 7, 14 y 28 días



4.2.4.1.7. Concreto con PR del 100%

Finalmente, los resultados del concreto con PR del 100% se ajustan a una distribución normal de acuerdo con la prueba de normalidad, donde el valor de probabilidad p es mayor que 0.01.

Figura 4.11 Prueba de normalidad - PR 100% para 7, 14 y 28 días



4.2.4.1.8. Discusión de los resultados de resistencia a compresión

En la figura 4.4, se puede observar que la densidad del concreto fresco es directamente proporcional a las resistencias a compresión del concreto ensayado a la edad de 7, 14 y 28 días para todos los porcentajes de reemplazo. La curva de tendencia lineal nos permite deducir que la resistencia a compresión y la densidad del concreto fresco disminuyen a medida que la cantidad de ACR aumenta en la mezcla.

Asimismo, podemos observar que todos los concretos que utilizaron ACR en la mezcla llegaron a resistencias a compresión menores que la del concreto de control. Por ejemplo, el concreto de 7 días usando ACR tiene una resistencia menor que la del concreto de control en un rango de 8% a 12%. La resistencia del concreto con ACR de 14 días es menor que la del concreto de control en un rango del 4% a 9%. Finalmente, la diferencia del concreto de 28 días es la más holgada, siendo del orden de 10% a 19% (Ver cuadro 4.20).

Sin embargo, las resistencias del concreto a los 28 días superan la resistencia de diseño f'_c en un rango de 12% a 28%. Las resistencias del concreto de control y de los concretos con PR de 20% y 30% a los 28 días son mayores que la resistencia promedio f'_{cr} en 14%, 4% y 2%, tal como se muestra en el cuadro 4.21. En cambio, las resistencias de los concretos con 40%, 50% y 100% están por debajo de la resistencia promedio en 2%, 3% y 6%.

Finalmente, la relación teórica de la resistencia del concreto a los 28 días es 1.33 veces la resistencia del concreto a los 7 días. En este caso los coeficientes reales para las resistencias a los 28 días son mayores que el valor teórico 1.33 debido que las resistencias encontradas en laboratorio son mayores que las teóricas (ver cuadro 4.21).

4.2.5. Módulo de elasticidad (E_c) vs módulo de elasticidad teórico (E_{c1})

Comparando los resultados del módulo de elasticidad calculado por el método gráfico (E_c) y el método teórico del Comité 318M del ACI, 2014 (E_{c1}) (ver cuadros 4.22 y 4.23) se puede deducir que a diferencia del módulo de elasticidad $E_c = 4.5 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$, el módulo de elasticidad E_{c1} está en el orden de 2.4×10^5 . Este último valor está dentro del rango teórico de 1.4×10^5 y 4.2×10^5 , donde se suele asumir 2.1×10^5 .

Considerando que el módulo de elasticidad es una medida de la rigidez del concreto, se presume que esta diferencia se debe a que se ha tenido en cuenta la

deformación de los neoprenos al utilizar un deformímetro mecánico en la máquina universal para el cálculo de E_c . De contar con un compresómetro, las deformaciones son tomadas en el espécimen de concreto, evitando así la influencia de factores externos en las lecturas.

4.2.6. Resistencia a flexión

Por teoría, el módulo de rotura representa entre un 10% y un 20% de la resistencia a compresión. En esta investigación, el módulo de rotura representa el 13% de la resistencia a compresión tanto para el concreto de control como para el concreto con PR de 20%.

4.3. Contrastación de hipótesis

Después del análisis e interpretación de los resultados obtenidos en la presente investigación, la hipótesis: “El uso de agregado de concreto reciclado en la fabricación de un concreto $f'_c=250$ kg/cm² aumenta su resistencia a la compresión en un 20% en comparación al concreto de control” se contrasta de la siguiente manera: La hipótesis planteada es falsa debido a que las resistencias a compresión alcanzadas por el concreto elaborado con agregado de concreto reciclado no superan el 20% de la resistencia a compresión del concreto de control. Por el contrario, los valores alcanzados a los 7, 14 y 28 días fueron menores a la resistencia máxima alcanzada por el concreto de control en un promedio de 10% para 7 días, 7% para 14 días, y de 15% para 28 días en los casos donde se usó agregado reciclado. Sin embargo, las resistencias del concreto con ACR superan la resistencia de diseño f'_c y están alrededor de la resistencia promedio f'_{cr} en no más del 6%.

4.4. Evaluación económica de la investigación

En comparación con el presupuesto del Proyecto de Tesis igual a S/3000.00, el costo total de la presente investigación asciende a S/ 2,144.50, tal como lo muestra el cuadro 4.26.

Cuadro 4.26 Costos unitarios de investigación

Ítem	Descripción	Unidad	Cant.	PU (S/)	Total
1.0	CAMPO				1,030.00
1.1	Materiales (EPP, cinceles, combas, costales, mantas)	glb	1.00	120.00	120.00
1.2	Mano de obra	glb	1.00	110.00	110.00
1.3	Transporte	glb	1.00	200.00	200.00
1.4	Trituración de material en Chancadora "Roca Fuerte"	glb	1.00	600.00	600.00
2.0	LABORATORIO				636.00
2.1	Materiales				436.00
2.2.1	Cemento	bls	8.00	22.50	180.00
2.2.2	Agregado fino natural	m3	1.00	90.00	90.00
2.2.3	Agregado grueso natural	m3	1.00	80.00	80.00
2.2.4	Vidrio	und	1.00	6.00	6.00
2.2.5	Almohadilla de neopréno	und	2.00	40.00	80.00
2.2	Mano de obra	glb	1.00	200.00	200.00
3.0	GABINETE				478.50
3.1	Bibliografía	und	2.00	35.00	70.00
3.2	Normas Técnicas Peruanas	glb	1.00	408.50	408.50
TOTAL (S/)					2,144.50

CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- 1) Las resistencias a compresión a los 28 días del concreto elaborado con agregado de concreto reciclado (ACR) son menores que la resistencia del concreto de control elaborado con agregado natural en 10% al 20% de reemplazo, 12% al 30% de reemplazo, 16% al 40% y 50% de reemplazo y 19% al 100% de reemplazo.
- 2) Las resistencias del concreto con ACR superan la resistencia de diseño $f'_c = 250 \text{ kg/cm}^2$ en todos los casos y rodean la resistencia promedio $f'_{cr} = 300 \text{ kg/cm}^2$ en no más de 6%.
- 3) El módulo de elasticidad calculado por el método gráfico $E_c = 4.5 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ difiere del módulo de elasticidad calculado con la fórmula del Comité 318M del ACI $E_{c1} = 2.4 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ (valor aproximado al propuesto por el Comité ACI igual a 2.1×10^5).
- 4) Los módulos de rotura (M_r), tanto del concreto de control como del concreto con ACR al 20% de reemplazo, equivalen al 13% de sus respectivas resistencias a compresión, el cual está dentro del rango teórico del 10% al 20%.
- 5) Considerando que los ACR son menos densos que los agregados naturales debido a la estructura porosa de la pasta adherida al agregado original, los ACR son menos resistentes al tener una menor área neta de sólidos, afectando así la resistencia mecánica del concreto. A medida que la cantidad de ACR aumenta en la mezcla, la resistencia a compresión y la densidad del concreto fresco siguen una tendencia lineal negativa.

5.2. Recomendaciones

- 1) Realizar investigaciones complementarias que evalúen el comportamiento del agregado de concreto reciclado por durabilidad ante condiciones de deshielo y congelamiento, temperaturas extremas, reacción álcali-agregado y concreto saturado.
- 2) Ampliar la investigación al uso de otros materiales de construcción reciclados en la elaboración de concreto que sirvan como respaldo en la creación de normativa que incentive el reaprovechamiento de residuos de construcción y demolición.

CAPITULO VI: REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

ACI Committee 214. (2011). *Evaluation of Strength Test Results of Concrete (ACI 214R-11)*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.

ACI Committee 318M. (2014). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-02)*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.

Alvarez Torres, G. J. (2014). *Influencia en la resistencia del concreto al utilizar concreto reciclado como agregado grueso*. Universidad Privada del Norte, Facultad de Ingeniería. Cajamarca: Universidad Privada del Norte.

Angeli, E., Wagner, J., Lawrick, E., Moore, K., Anderson, M., Soderlund, L., & Brizee, A. (2010). *General format APA* (6ta Edición ed.).

Arriaga Taffhurt, L. E. (2013). *Utilización de agregado grueso de concreto reciclado en elementos estructurales de concreto reforzado*. Escuela Colombiana de Ingeniería "Julio Garavito, Centro de estudios de estructuras, materiales y construcción, Bogotá.

ASTM C 469. (1994). *Standar Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*. West Conshohocken, PA: ASTM International.

ASTM C 702. (1998). *Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size* (3ra Edición ed.). Conshohocken, PA, USA: The American Society for Testing and Materials .

ASTM C78 / C78M. (2016). *Standard Test Method for Flexural Streght of Concrete (Using Simple Beam with Third Point Loading)*. West Conshohocken, PA: ASTM International.

Borja S., M. (2012). *Metodología de la investigación científica para ingenieros*. Chiclayo.

D.L. N° 1278. (2016). *Ley de gestión integral de residuos sólidos*. Ministerio del Ambiente. Lima: Diario El Peruano.

D.S. N° 003-2013. (2013). *Reglamento para la gestión y manejo de los residuos de las actividades de la construcción y demolición*. Ministerio de Vivienda. Lima: Diario El Peruano.

Edge Environment Pty Ltd. (2012). *Construction and Demolition Waste Guide - Recycling and Reuse Across the Supply Chain*. Department of Sustainability, Environment, Water, Population and Communities. Australia: Australian Government.

García Ccallocunto, C. (29 de Febrero de 2012). ¿Resistencia a la flexión? Lima, Peru: Duravía.

Gestión. (23 de Enero de 2017). FMI elevó proyección de crecimiento de economía peruana de 4.1% a 4.3% el 2017. *Diario Gestión*.

Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2010). *Metodología De La Investigación* (Quinta ed.). México D.F., México: McGraw-Hill. Recuperado el 20 de Junio de 2016

INEI. (2016). *El Perú tiene una población de 31 millones 488 mil 625 habitantes*. Nota de prensa, Instituto Nacional de Estadística e Informática, Lima.

Jordan Saldaña, J. C., & Viera Caballero, N. (2014). *Estudio de la resistencia del concreto, utilizando como agregado el concreto reciclado de obra*. Universidad Nacional del Santa, Facultad de Ingeniería. Nuevo Chimbote: Universidad Nacional del Santa.

Ley N° 29419. (2009). *Ley que regula la actividad de los recicladores*. Ministerio del Ambiente. Lima: Congreso de la República.

Ministerio del Ambiente. (2008). *Informe de la situación actual de la gestión de residuos sólidos no municipales*. Lima: Ministerio del Ambiente.

Mjelde, D. G. (2013). *Evaluation of recycled concrete for use as aggregate in new concrete pavements*. Tesis MS, Washington State University, Department of Civil and Environmental Engineering, Pullman.

NTP 339.034. (2008). *CONCRETO. Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto en muestras cilíndricas* (3ra Edición ed.). Lima, Peru: INACAL.

NTP 339.035. (2009). *CONCRETO. Método de ensayo para la medición del asentamiento del concreto de cemento Portland* (3ra Edición ed.). Lima, Peru: INACAL.

NTP 339.046. (2008). *CONCRETO. Método de ensayo para determinar la densidad (peso unitario), rendimiento y contenido de aire (método gravimétrico) del concreto*. Lima, Peru: 2da Edición.

NTP 339.047. (2014). *CONCRETO. Definiciones y terminología relativas al concreto y agregados* (3ra Edición ed.). Lima, Peru: INACAL.

NTP 339.079. (2012). *CONCRETO. Método de ensayo para determinar la resistencia a la flexión del concreto en vigas simplemente apoyadas con cargas en el centro del tramo* (3ra Edición ed.). Lima, Peru: INACAL.

NTP 339.083. (2003). *CONCRETO. Método de ensayo normalizado para contenido de aire de mezcla de concreto fresco, por el método de presión* (2da Edición ed.). Lima, Peru: INACAL.

NTP 339.183. (2013). *CONCRETO. Práctica normalizada para la elaboración y curado de especímenes de concreto en el laboratorio* (2da ed.). Lima, Perú: INCAL.

NTP 339.184. (2002). *CONCRETO. Método de ensayo normalizado para determinar la temperatura de mezclas de concreto*. (1ra Edición ed.). Lima, Peru: INACAL.

NTP 400.010. (2016). *AGREGADOS. Extracción y preparación de las muestras* (3ra Edición ed.). Lima, Peru: INACAL.

NTP 400.011. (2008). *AGREGADOS. Definición y clasificación de agregados para uso en morteros y hormigones (concreto)* (2da Edición ed.). Lima, Peru: INDECOPI.

NTP 400.012. (2013). *AGREGADOS. Análisis granulométrico del agregado fino, grueso y global* (3ra Edición ed.). Lima, Peru.

NTP 400.017. (2016). *AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para determinar la masa por unidad de volumen o densidad (Peso Unitario) y los vacíos en los agregados* (3ra Edición ed.). Lima, Peru: Instituto Nacional de Calidad.

NTP 400.018. (2013). *AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para determinar materiales más finos que pasan por el tamiz normalizado N° 200 por lavado en agregados.* (3ra Edición ed.). Lima: Instituto Nacional de Calidad.

NTP 400.019. (2014). *AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la degradación en agregados gruesos de tamaños menores por abrasión e impacto en la máquina de Los Ángeles* (3ra Edición ed.). Lima, Perú: Instituto Nacional de Calidad.

NTP 400.021. (2013). *AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para la densidad, la densidad relativa (peso específico) y absorción del agregado grueso* (3ra Edición ed.). Lima, Peru: Instituto Nacional de Calidad.

NTP 400.022. (2013). *AGREGADOS: Método de ensayo normalizado para la densidad, la densidad relativa (peso específico) y absorción del agregado fino* (3ra Edición ed.). Lima, Perú: Instituto Nacional de Calidad.

NTP 400.037. (2014). *CONCRETO. Especificaciones normalizadas para agregados en concreto* (3ra Edición ed.). Lima, Peru: INACAL.

OEFA. (Febrero de 2014). *La fiscalización ambiental en residuos sólidos.* Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental. Lima: OEFA.

Osorio, J. D. (20 de Mayo de 2013). *Reacción álcali agregado: Un ensayo importante en la tecnología del concreto.* Ocaña, Norte de Santander, Colombia: Blog 360° en concreto.

Rivva Lopez, E. (2014). *Concreto: Diseño de Mezcla* (2da Edición ed., Vol. II). Lima: Instituto de la Construcción y Gerencia.

Rivva Lopez, E. (2014). *Concreto: Materiales para el concreto* (3ra Edición ed., Vol. I). Lima: Instituto de la Construcción y Gerencia.

Roser, M., & Ortiz-Ospina, E. (2016). *World Population Growth.* Obtenido de Our World in Data: <https://ourworldindata.org/world-population-growth/>

Rozo Bobadilla, N. R. (2012). *Estado del Arte del Aprovechamiento del Concreto Reciclado.* Universidad de Los Andes, Departamento de Ingeniería Ambiental. Bogota: Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental.

Sachs, J. D. (2015). *The Age of Sustainable Development*. New York: Columbia University Press.

Vanegas Cabrera, J. M., & Robles Castellanos, J. P. (2008). *Estudio experimental de las propiedades mecánicas del concreto reciclado para su uso en edificaciones convencionales*. Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería. Bogotá: Departamento de Ingeniería Civil.

Zhou, C., & Chen, Z. (1 de Marzo de 2017). Mechanical properties of recycled concrete made with different types of coarse aggregate. *Elsevier*, 134, 497-506.

ANEXOS

ANEXO A – PANEL FOTOGRÁFICO

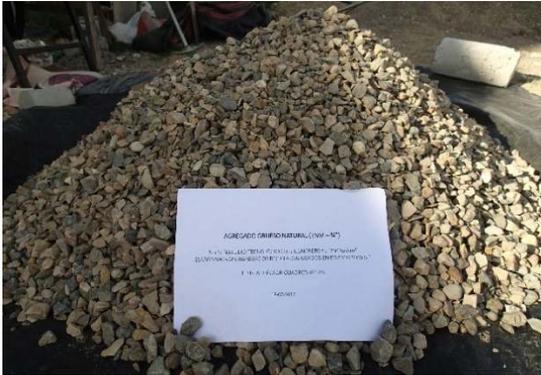


Foto 1. Agregado grueso natural lavado.



Foto 2. Agregado grueso reciclado.



Foto 3. Agregado fino natural.



Foto 4. Agregado fino reciclado.



Foto 5. Selección y reducción de RCD in situ.



Foto 6. Planta chancadora “Roca Fuerte”.



Foto 7. Chancadora primaria tipo quijada de 6”.



Foto 8. Chancadora secundaria tipo quijada de 3” y fajas transportadoras.



Foto 9. Lavado de agregado durante el tratamiento secundario.



Foto 10. Análisis granulométrico.



Foto 11. Lavado de AFN para determinar material $< 75 \mu\text{m}$.



Foto 12. Ensayo de densidad relativa del agregado grueso.



Foto 13. Ensayo de densidad relativa del AFN.



Foto 14. Densidad de masa del AFR.



Foto 15. Ensayo de asentamiento del concreto fresco.



Foto 16. Determinación de la densidad del concreto fresco.



Foto 17. Ensayo del contenido de aire del concreto fresco por el método de presión.



Foto 18. Moldeo de los especímenes prismáticos del concreto de control.



Foto 19. Identificación y medición de los testigos cilíndricos.



Foto 20. Fractura típica tipo 2 de los especímenes cilíndricos.



Foto 21. Rotura a compresión de especímenes cilíndricos.



Foto 22. Rotura a flexión de especímenes prismáticos.



Foto 23. Sección transversal típica de un espécimen prismático.

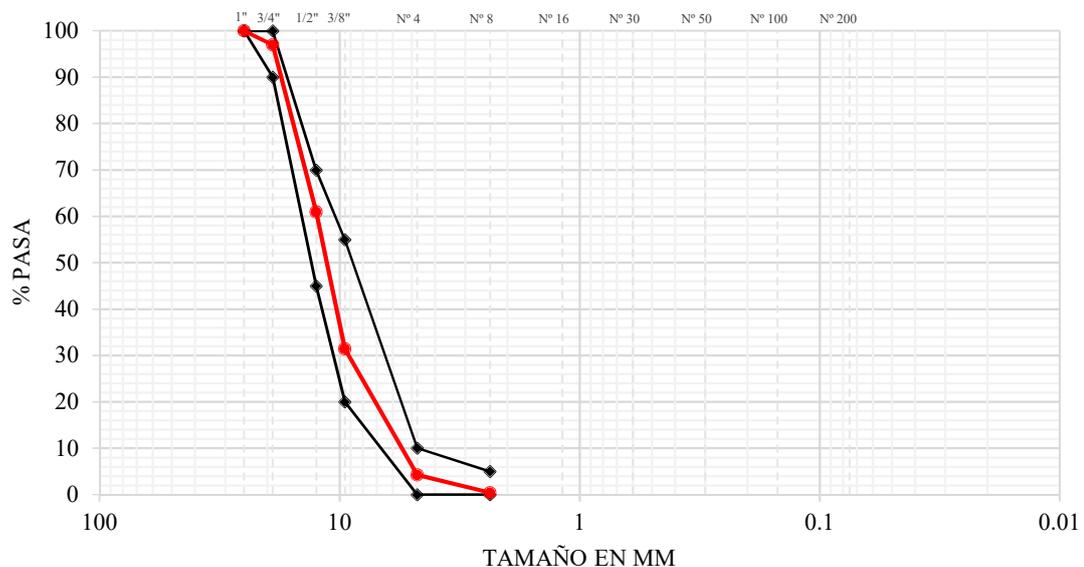
ANEXO B – PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE LOS AGREGADOS

AGREGADO GRUESO NATURAL (AGR)

Cuadro B.1 Análisis granulométrico del AGN N° 1

Tamiz		Peso retenido acumulado (g)	% Retenido acumulado	% Pasa promedio
N°	Abertura			
1"	25.00 mm	0.0	0.0	100.0
3/4"	19.00 mm	251.6	3.1	96.9
1/2"	12.50 mm	3193.7	39.0	61.0
3/8"	9.50 mm	5613.3	68.6	31.4
N° 4	4.75 mm	7837.0	95.7	4.3
N° 8	2.36 mm	8152.3	99.6	0.4
N° 16	1.18 mm	8152.3	99.6	0.4
N° 30	600 μ m	8152.3	99.6	0.4
N° 50	300 μ m	8152.3	99.6	0.4
N° 100	150 μ m	8152.3	99.6	0.4
N° 200	75 μ m	8171.6	99.8	0.2
Cazoleta		8173.4	99.8	0.2
Peso muestra seca inicial (g):				8186.6
Peso seco menor que malla N° 200 (g):				1.8
Porcentaje de error:				0.16%
Módulo de fineza:				6.65

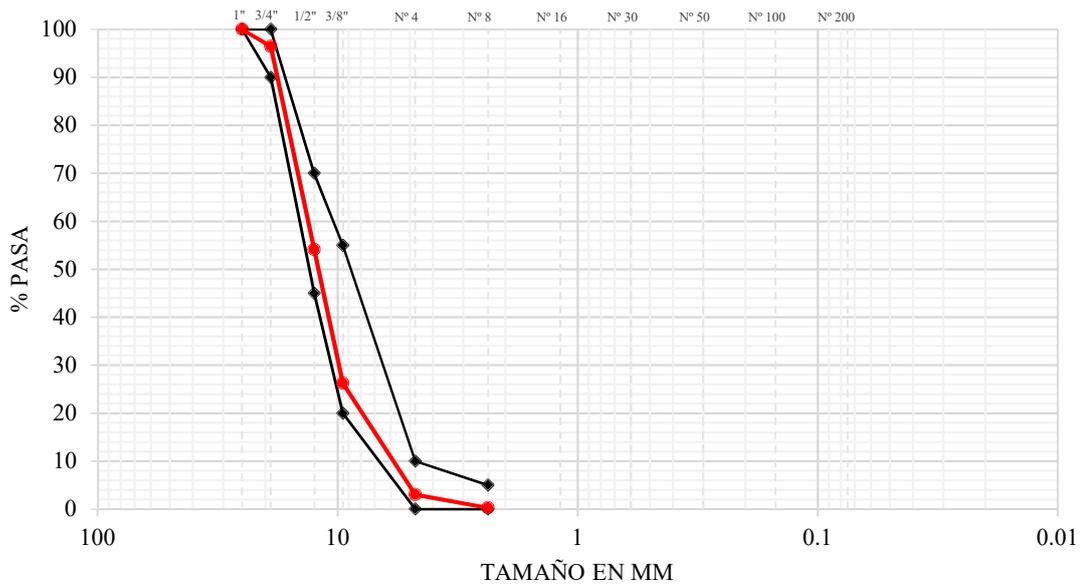
Figura B.1 Curva granulométrica del AGN N° 1



Cuadro B.2 Análisis granulométrico del AGN N° 2

Tamiz		Peso retenido acumulado (g)	% Retenido acumulado	% Pasa promedio
N°	Abertura			
1"	25.00 mm	0.0	0.0	100.0
3/4"	19.00 mm	295.4	3.6	96.4
1/2"	12.50 mm	3811.5	45.9	54.1
3/8"	9.50 mm	6125.6	73.8	26.2
N° 4	4.75 mm	8053.7	97.0	3.0
N° 8	2.36 mm	8281.4	99.7	0.3
N° 16	1.18 mm	8281.4	99.7	0.3
N° 30	600 μ m	8281.4	99.7	0.3
N° 50	300 μ m	8281.4	99.7	0.3
N° 100	150 μ m	8281.4	99.7	0.3
N° 200	75 μ m	8294.4	99.9	0.1
Cazoleta		8296.6	99.9	0.1
Peso muestra seca inicial (g)				8303.1
Peso seco menor que malla N° 200 (g):				2.2
Porcentaje de error				0.08%
Módulo de fineza				6.73

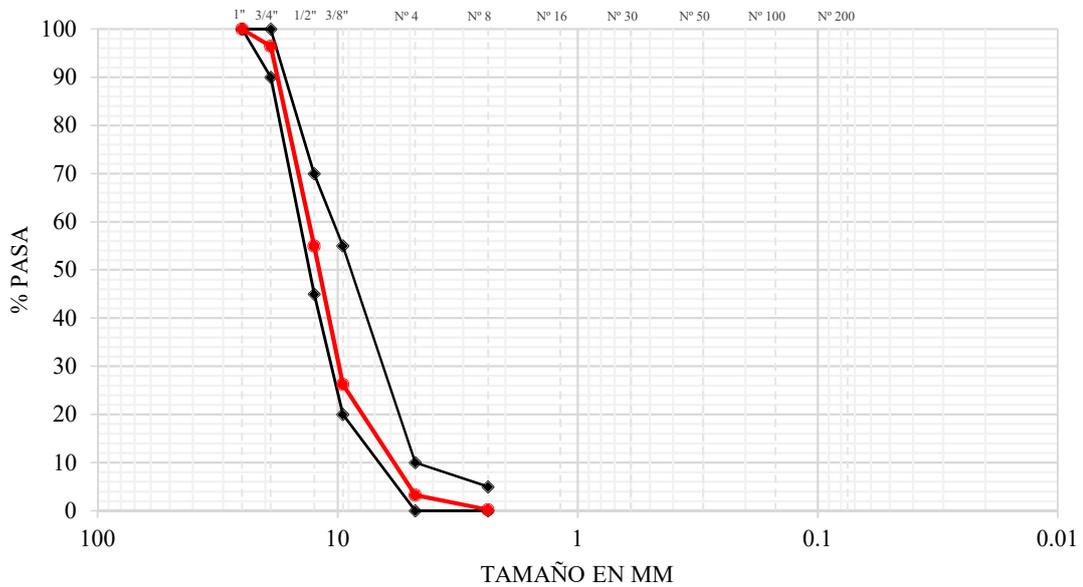
Figura B.2 Curva granulométrica del AGN N° 2



Cuadro B.3 Análisis granulométrico del AGN N° 3

Tamiz		Peso retenido acumulado (g)	% Retenido acumulado	% Pasa promedio
N°	Abertura			
1"	25.00 mm	0.0	0.0	100
3/4"	19.00 mm	300.3	3.6	96.4
1/2"	12.50 mm	3761.7	45.1	54.9
3/8"	9.50 mm	6158.7	73.8	26.2
N° 4	4.75 mm	8075.8	96.8	3.2
N° 8	2.36 mm	8328.3	99.8	0.2
N° 16	1.18 mm	8328.3	99.8	0.2
N° 30	600 μ m	8328.3	99.8	0.2
N° 50	300 μ m	8328.3	99.8	0.2
N° 100	150 μ m	8328.3	99.8	0.2
N° 200	75 μ m	8335.3	99.9	0.1
Cazoleta		8296.6	99.9	0.1
Peso muestra seca inicial (g)				8347.2
Peso seco menor que malla N° 200 (g):				1.7
Porcentaje de error				0.12%
Módulo de fineza				6.73

Figura B.3 Curva granulométrica del AGN N° 3



Cuadro B.4 Densidad relativa y absorción del AGN

Descripción	Unidad	M-1	M-2	M-3
1.0 Peso específico				
Masa recipiente	g	147.9	148.7	146.78
Masa SSS + recipiente	g	3641.1	3579.5	3704.2
Masa SSS*	g	3493.2	3430.9	3557.5
Masa muestra + canastilla sumergida	g	2872.3	2837.9	2914.2
Masa canastilla sumergida	g	692.3	692.3	692.3
Masa aparente muestra saturada	g	2180.0	2145.6	2221.9
Masa muestra seca + recipiente	g	3609.8	3551.1	3672.0
Masa muestra seca	g	3461.9	3402.4	3525.2
Temperatura del agua	°C	15.0	15.0	15.0
Densidad del agua**	kg/m3	999.1	999.1	999.1
Densidad SH*	kg/m3	2630	2640	2640
Densidad SSS	kg/m3	2660	2670	2660
Densidad aparente	kg/m3	2700	2710	2700
Peso específico (SH)		2.64	2.65	2.64
Peso específico (SSS)		2.66	2.67	2.66
Peso específico aparente		2.70	2.71	2.70
Densidad SH promedio	kg/m3		2637	
Densidad SSS promedio	kg/m3		2663	
Densidad aparente promedio	kg/m3		2703	
Peso específico (SH) promedio			2.64	
Peso específico (SSS) promedio			2.66	
Peso específico aparente promedio			2.70	
2.0 Absorción				
Masa muestra seca	g	3461.9	3402.4	3525.2
Masa SSS	g	3493.2	3430.9	3557.5
Absorción	%	0.9	0.8	0.9
Absorción promedio	%		0.9	

Cuadro B.5 Densidad de masa y vacíos del AGN

Descripción	Unidad	M-1	M-2	M-3
1.0 Calibración del recipiente		Resultado		
Masa placa de vidrio + recipiente	kg		5.55	
Masa placa de vidrio + recipiente + agua	kg		15.35	
Temperatura del agua	°C		15	
Densidad del agua*	kg/m3		999.11	
Masa del agua	kg		9.80	
Factor f del recipiente	1/m3		101.95	
2.0 Densidad de masa en condición suelto				
Masa del recipiente + muestra	kg	18.30	18.25	18.40
Masa del recipiente	kg	4.20	4.20	4.20
Masa de la muestra	kg	14.10	14.05	14.20
Densidad de masa suelto	kg/m3	1440	1430	1450
Densidad de masa suelto promedio	kg/m3		1440	
3.0 Densidad de masa en condición compactado				
Masa del recipiente + muestra	kg	19.30	19.60	19.25
Masa del recipiente	kg	4.20	4.20	4.20
Masa de la muestra	kg	15.10	15.40	15.05
Densidad de masa por apisonado	kg/m3	1540	1570	1530
Densidad de masa por apisonado promedio	kg/m3		1550	
4.0 Contenido de vacíos				
Peso específico de masa	kg/m3	2.64	2.65	2.64
Densidad del agua	kg/m3	999.10	999.10	999.10
Vacíos agregado compactado	%	42	41	42
Vacíos agregado suelto	%	45	46	45
Vacíos agregado compactado promedio	%		41	
Vacíos agregado suelto promedio	%		45	

Cuadro B.6 Contenido de humedad del AGN

Descripción	Unidad	M-1	M-2	M-3
1.0 Contenido total de humedad evaporable				
Masa recipiente + muestra húmeda	g	3151	3142	2843
Masa recipiente	g	140	194	163
Masa muestra húmeda	g	3011	2948	2680
Masa recipiente + muestra seca	g	3146	3136	2837
Masa muestra seca	g	3005	2943	2674
Contenido total de humedad	%	0.2	0.2	0.2
Contenido total de humedad prom.	%		0.2	

Cuadro B.7 Resistencia a la abrasión del AGN

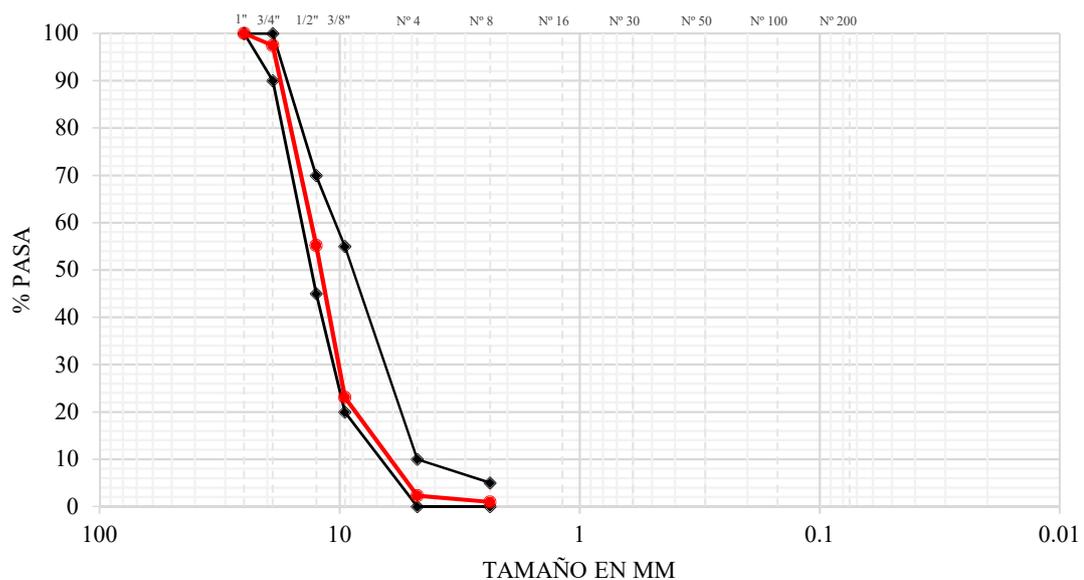
Descripción	Unidad	M-1	M-2	M-3
1.0 Resistencia a la degradación en agregados gruesos de tamaños menores por abrasión e impacto en la máquina de Los Angeles				
Tamaño nominal máximo	-		3/4"	
Gradación	-	A	B	C D
Pasa tamiz 3/4" y retenido 1/2"	g	2500	2500	2500
Pasa tamiz 1/2" y retenido 3/8"	g	2500	2500	2500
Masa combinada	g	5000	5000	5000
Masa recipiente	g	250	298	141
Muestra seca >Nº16 + recipiente	g	3821	3896	3722
Masa retenida en tamiz Nº 16	g	3571	3598	3581
Pérdida por abrasión e impacto	%	29	28	28
Pérdida por abrasión e impacto promedio	%		28	

AGREGADO GRUESO RECICLADO (AGR)

Cuadro B.8 Análisis granulométrico del AGR N° 1

Tamiz		Peso retenido acumulado (g)	% Retenido acumulado	% Pasa promedio
N°	Abertura			
1"	25.00 mm	0.0	0.0	100.0
3/4"	19.00 mm	211.9	2.6	97.4
1/2"	12.50 mm	3656.0	44.8	55.2
3/8"	9.50 mm	6278.1	76.9	23.1
N° 4	4.75 mm	7977.7	97.7	2.3
N° 8	2.36 mm	8084.0	99.0	1.0
N° 16	1.18 mm	8084.0	99.0	1.0
N° 30	600 μ m	8084.0	99.0	1.0
N° 50	300 μ m	8084.0	99.0	1.0
N° 100	150 μ m	8084.0	99.0	1.0
N° 200	75 μ m	8136.1	99.7	0.3
Cazoleta		8149.6	99.8	0.2
Peso muestra seca inicial (g):				8163.2
Peso seco menor que malla N° 200 (g):				13.5
Porcentaje de error:				0.17%
Módulo de fineza:				6.72

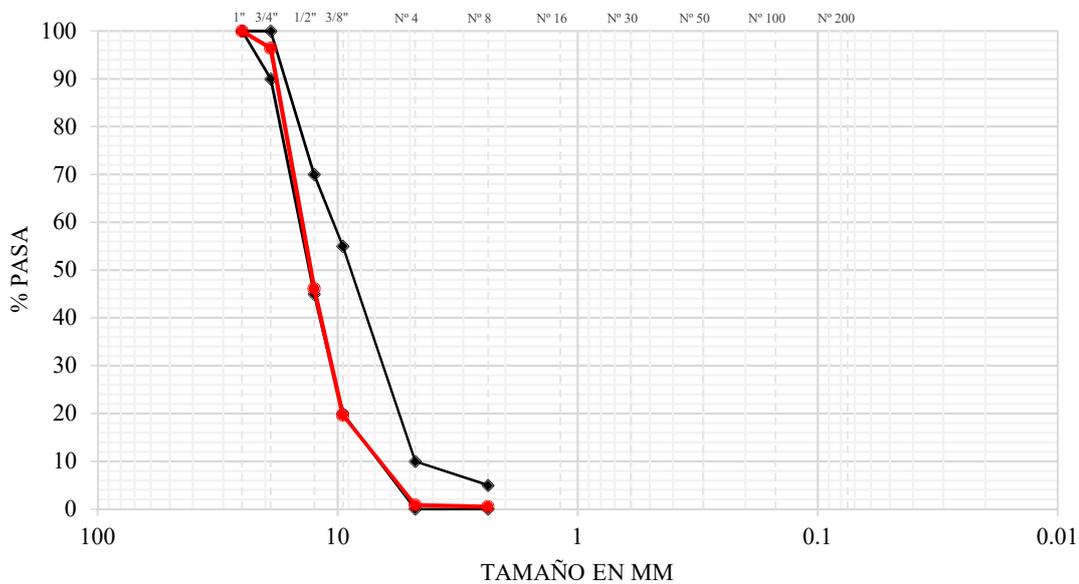
Figura B.4 Curva granulométrica del AGR N° 1



Cuadro B.9 Análisis granulométrico AGR N° 2

Tamiz		Peso retenido acumulado (g)	% Retenido acumulado	% Pasa promedio
N°	Abertura			
1"	25.00 mm	0.0	0.00	100.0
3/4"	19.00 mm	288.5	3.6	96.4
1/2"	12.50 mm	4311.8	53.9	46.1
3/8"	9.50 mm	6426.4	80.3	19.7
N° 4	4.75 mm	7936.1	99.2	0.8
N° 8	2.36 mm	7961.1	99.5	0.5
N° 16	1.18 mm	7961.1	99.5	0.5
N° 30	600 μ m	7961.1	99.5	0.5
N° 50	300 μ m	7961.1	99.5	0.5
N° 100	150 μ m	7961.1	99.5	0.5
N° 200	75 μ m	7975.7	99.7	0.3
Cazoleta		7981.4	99.8	0.2
Peso muestra seca inicial (g)				8000.0
Peso seco menor que malla N° 200 (g):				5.7
Porcentaje de error				0.23%
Módulo de fineza				6.81

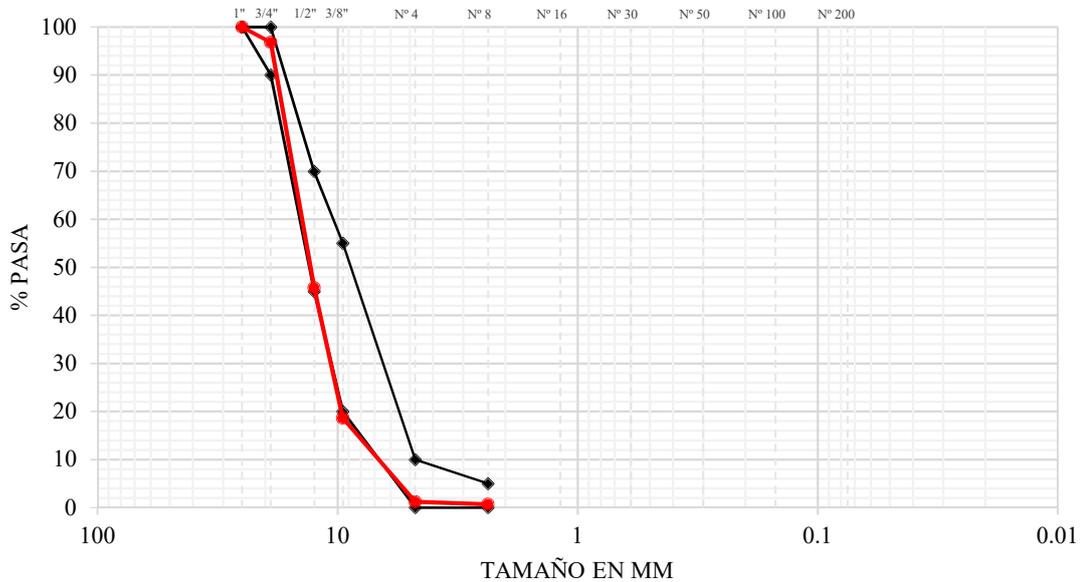
Figura B.5 Curva granulométrica del AGR N° 2



Cuadro B.10 Análisis granulométrico AGR N° 3

Tamiz		Peso retenido acumulado (g)	% Retenido acumulado	% Pasa promedio
N°	Abertura			
1"	25.00 mm	0.0	0.00	100.0
3/4"	19.00 mm	258.2	3.2	96.8
1/2"	12.50 mm	4394.0	54.3	45.7
3/8"	9.50 mm	6594.1	81.4	18.6
N° 4	4.75 mm	8001.6	98.8	1.2
N° 8	2.36 mm	8045.8	99.3	0.7
N° 16	1.18 mm	8045.8	99.3	0.7
N° 30	600 μ m	8045.8	99.3	0.7
N° 50	300 μ m	8045.8	99.3	0.7
N° 100	150 μ m	8045.8	99.3	0.7
N° 200	75 μ m	8077.4	99.7	0.3
Cazoleta		8083.8	99.8	0.2
Peso muestra seca inicial (g)				8100.0
Peso seco menor que malla N° 200 (g):				6.4
Porcentaje de error				0.2%
Módulo de fineza				6.8

Figura B.6 Curva granulométrica del AGR N° 3



Cuadro B.11 Densidad relativa y absorción del AGR

Descripción	Unidad	M-1	M-2	M-3
1.0 Peso específico				
Masa recipiente	g	146.9	148.3	147.8
Masa SSS + recipiente	g	2749.9	2746.3	2761.1
Masa SSS*	g	2603.0	2598.0	2613.3
Masa muestra + canastilla sumergida	g	2224.6	2220.6	2229.4
Masa canastilla sumergida	g	692.3	692.3	692.3
Masa aparente muestra saturada	g	1532.3	1528.3	1537.1
Masa muestra seca + recipiente	g	2625.5	2619.1	2632.8
Masa muestra seca	g	2478.6	2470.8	2485.0
Temperatura del agua	°C	15.0	15.0	15.0
Densidad del agua**	kg/m3	999.1	999.1	999.1
Densidad SH*	kg/m3	2310	2310	2310
Densidad SSS	kg/m3	2430	2430	2430
Densidad aparente	kg/m3	2620	2620	2620
Peso específico (SH)		2.32	2.31	2.31
Peso específico (SSS)		2.43	2.43	2.43
Peso específico aparente		2.62	2.62	2.62
Densidad SH promedio	kg/m3		2310	
Densidad SSS promedio	kg/m3		2430	
Densidad aparente promedio	kg/m3		2620	
Peso específico (SH) promedio			2.31	
Peso específico (SSS) promedio			2.43	
Peso específico aparente promedio			2.62	
2.0 Absorción				
Masa muestra seca	g	2478.6	2470.8	2485.0
Masa SSS	g	2603.0	2598.0	2613.3
Absorción	%	5.0	5.1	5.2
Absorción promedio	%		5.1	

Cuadro B.12 Densidad de masa y vacíos del AGR

Descripción	Unidad	M-1	M-2	M-3
1.0 Calibración del recipiente		Resultado		
Masa placa de vidrio + recipiente	kg		5.55	
Masa placa de vidrio + recipiente + agua	kg		15.35	
Temperatura del agua	°C		15	
Densidad del agua*	kg/m3		999.11	
Masa del agua	kg		9.80	
Factor f del recipiente	1/m3		101.95	
2.0 Densidad de masa en condición suelto				
Masa del recipiente + muestra	kg	15.85	15.95	15.70
Masa del recipiente	kg	4.20	4.20	4.20
Masa de la muestra	kg	11.65	11.75	11.50
Densidad de masa suelto	kg/m3	1190	1200	1170
Densidad de masa suelto promedio	kg/m3		1190	
3.0 Densidad de masa en condición compactado				
Masa del recipiente + muestra	kg	16.95	16.85	16.85
Masa del recipiente	kg	4.20	4.20	4.20
Masa de la muestra	kg	12.75	12.65	12.65
Densidad de masa por apisonado	kg/m3	1300	1290	1290
Densidad de masa por apisonado promedio	kg/m3		1290	
4.0 Contenido de vacíos				
Peso específico de masa	kg/m3	2.32	2.31	2.31
Densidad del agua	kg/m3	998.00	998.00	998.00
Vacíos agregado compactado	%	44	44	44
Vacíos agregado suelto	%	48	48	49
Vacíos agregado compactado promedio	%		44	
Vacíos agregado suelto promedio	%		49	

Figura B.1 Contenido de humedad del AGR

Descripción	Unidad	M-1	M-2	M-3
1.0 Contenido total de humedad evaporable				
Masa recipiente + muestra húmeda	g	2792	3452	3728
Masa recipiente	g	204	299	251
Masa muestra húmeda	g	2588	3153	3477
Masa recipiente + muestra seca	g	2777	3431	3709
Masa muestra seca	g	2573	3132	3458
Contenido total de humedad	%	0.6	0.7	0.6
Contenido total de humedad prom.	%		0.6	

Cuadro B.14 Resistencia a la abrasión del AGR

Descripción	Unidad	M-1	M-2	M-3
1.0 Resistencia a la degradación en agregados gruesos de tamaños menores por abrasión e impacto en la máquina de Los Angeles				
Tamaño nominal máximo	-		3/4"	
Gradación	-	A	B	C D
Pasa tamiz 3/4" y retenido 1/2"	g	2502	2501	2501
Pasa tamiz 1/2" y retenido 3/8"	g	2501	2501	2502
Masa combinada	g	5003	5002	5003
Masa recipiente	g	206	233	303
Muestra seca >Nº16 + recipiente	g	3014	3026	3138
Masa retenida en tamiz Nº 16	g	2807	2793	2835
Pérdida por abrasión e impacto	%	44	44	43
Pérdida por abrasión e impacto promedio	%		44	

Cuadro B.15 Cantidad de material más fino que el tamiz de 75 µm del AGR

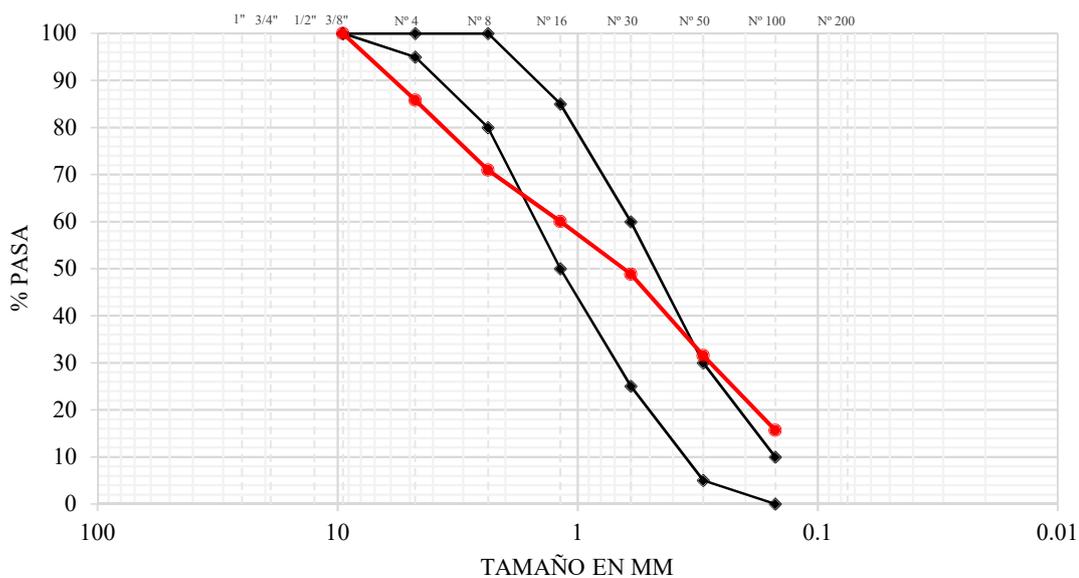
Descripción	Unidad	M-1	M-2	M-3
1.0 Material mas fino que pasa por el tamiz de 75 µm (Nº 200)				
Masa muestra original + recipiente	g	3574	3549	3319
Masa recipiente	g	141	251	209
Masa muestra original	g	3433	3298	3111
Masa muestra lavada + recipiente	g	3536	3514	3284
Masa muestra lavada	g	3395	3262	3075
Material más fino tamiz Nº 200	%	1.1	1.1	1.1
Contenido total de humedad prom.	%		1.1	

AGREGADO FINO NATURAL (AFN)

Cuadro B.16 Análisis granulométrico del AFN original N° 1

Tamiz		Peso retenido acumulado (g)	% Retenido acumulado	% Pasa promedio
N°	Abertura			
1"	25.00 mm	0.0	0.0	100.0
3/4"	19.00 mm	0.0	0.0	100.0
1/2"	12.50 mm	0.0	0.0	100.0
3/8"	9.50 mm	0.0	0.0	100.0
N° 4	4.75 mm	100.8	14.2	85.8
N° 8	2.36 mm	206.6	29.1	70.9
N° 16	1.18 mm	283.8	39.9	60.1
N° 30	600 μ m	363.4	51.1	48.9
N° 50	300 μ m	486.7	68.5	31.5
N° 100	150 μ m	599.3	84.3	15.7
N° 200	75 μ m	648.2	91.2	8.8
Cazoleta		710.8	100.0	0.0
Peso muestra seca inicial (g):				710.8
Peso seco menor que malla N° 200 (g):				62.6
Porcentaje de error:				0.0%
Módulo de fineza:				2.87

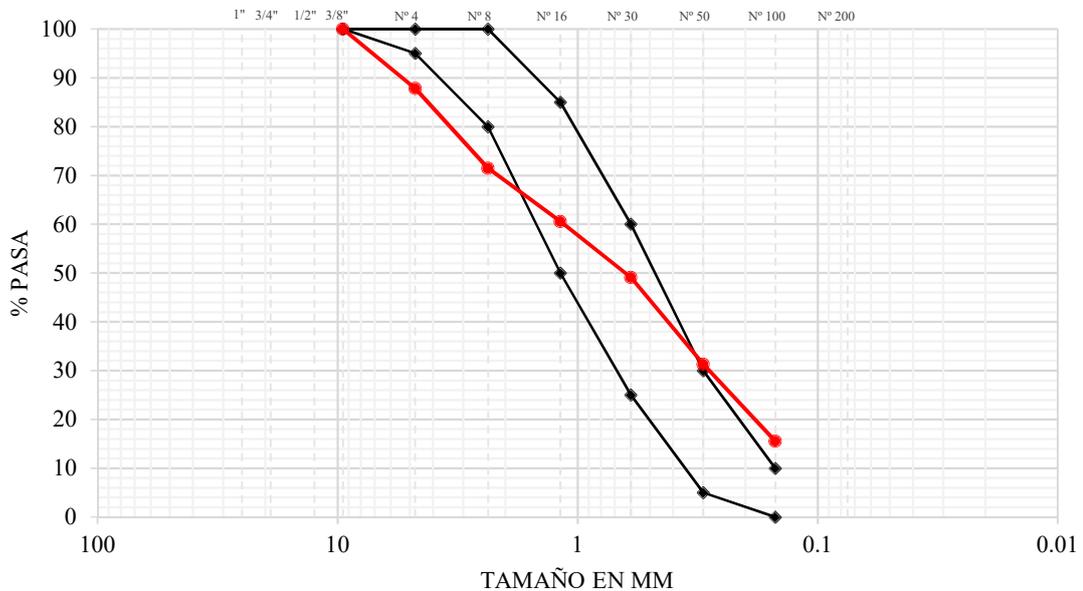
Figura B.7 Curva granulométrica del AFN original N° 1



Cuadro B.17 Análisis granulométrico AFN original N° 2

Tamiz		Peso retenido acumulado (g)	% Retenido acumulado	% Pasa promedio
N°	Abertura			
1"	25.00 mm	0.0	0.0	100.0
3/4"	19.00 mm	0.0	0.0	100.0
1/2"	12.50 mm	0.0	0.0	100.0
3/8"	9.50 mm	0.0	0.0	100.0
N° 4	4.75 mm	95.4	12.2	87.8
N° 8	2.36 mm	223.9	28.5	71.5
N° 16	1.18 mm	309.7	39.5	60.5
N° 30	600 μ m	399.5	50.9	49.1
N° 50	300 μ m	538.8	68.7	31.3
N° 100	150 μ m	662.5	84.5	15.5
N° 200	75 μ m	715.9	91.3	8.7
Cazoleta		784.4	100.0	0.0
Peso muestra seca inicial (g)				784.4
Peso seco menor que malla N° 200 (g):				68.5
Porcentaje de error				0.0%
Módulo de fineza				2.84

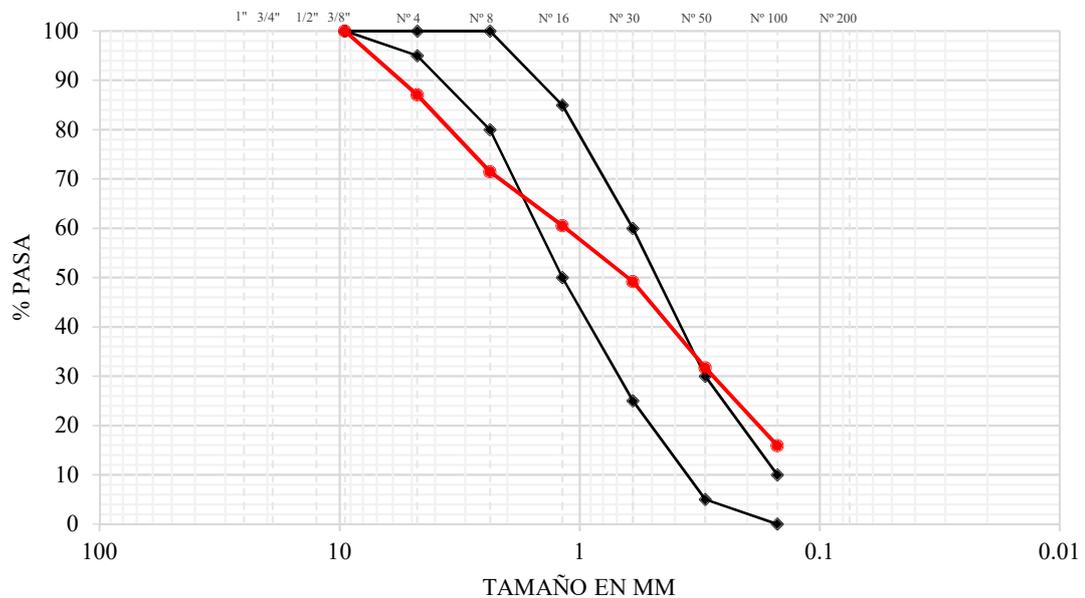
Figura B.8 Curva granulométrica del AFN original N° 2



Cuadro B.18 Análisis granulométrico del AFN original N° 3

Tamiz		Peso retenido acumulado (g)	% Retenido acumulado	% Pasa promedio
N°	Abertura			
1"	25.00 mm	0.0	0.0	100.0
3/4"	19.00 mm	0.0	0.0	100.0
1/2"	12.50 mm	0.0	0.0	100.0
3/8"	9.50 mm	0.0	0.0	100.0
N° 4	4.75 mm	101.1	12.9	87.1
N° 8	2.36 mm	222.8	28.5	71.5
N° 16	1.18 mm	308.5	39.5	60.5
N° 30	600 μm	397.0	50.8	49.2
N° 50	300 μm	533.7	68.3	31.7
N° 100	150 μm	656.7	84.1	15.9
N° 200	75 μm	710.3	90.9	9.1
Cazoleta		780.9	100.0	0.0
Peso muestra seca inicial (g)				781.0
Peso seco menor que malla N° 200 (g):				70.6
Porcentaje de error				0.0%
Módulo de fineza				2.84

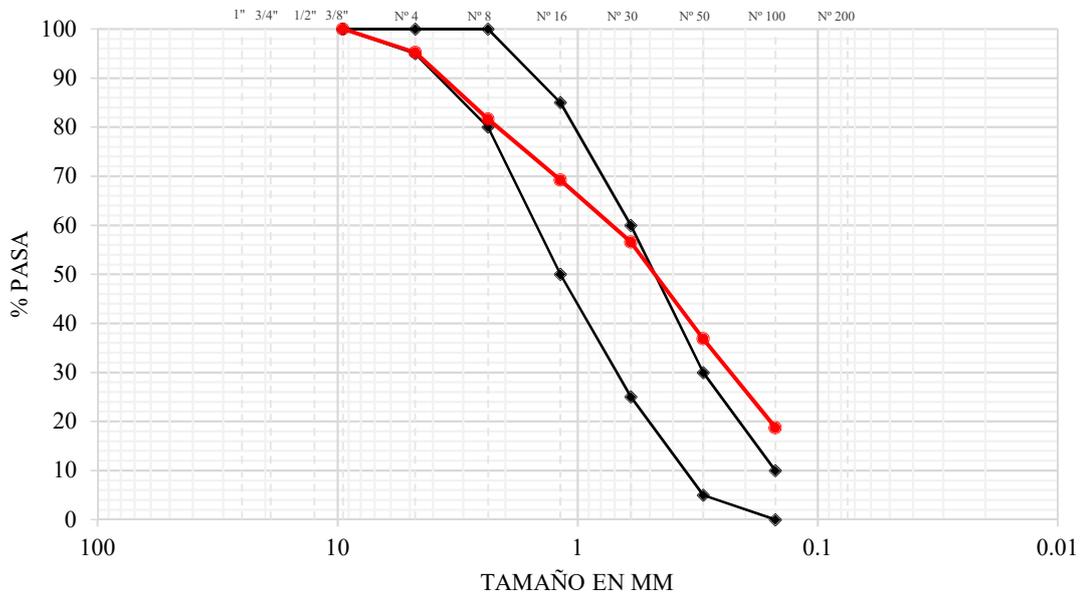
Figura B.9 Curva granulométrica del AFN original N° 3



Cuadro B.19 Análisis granulométrico del AFN tamizado N° 1

Tamiz		Peso retenido acumulado (g)	% Retenido acumulado	% Pasa promedio
N°	Abertura			
1"	25.00 mm	0.0	0.0	100.0
3/4"	19.00 mm	0.0	0.0	100.0
1/2"	12.50 mm	0.0	0.0	100.0
3/8"	9.50 mm	0.0	0.0	100.0
N° 4	4.75 mm	20.1	4.7	95.3
N° 8	2.36 mm	77.9	18.4	81.6
N° 16	1.18 mm	130.6	30.8	69.2
N° 30	600 μ m	184.2	43.4	56.6
N° 50	300 μ m	267.8	63.2	36.8
N° 100	150 μ m	344.6	81.3	18.7
N° 200	75 μ m	379.0	89.4	10.6
Cazoleta		424.6	100.1	-0.1
Peso muestra seca inicial (g):				424.0
Peso seco menor que malla N° 200 (g):				45.6
Porcentaje de error:				-0.1%
Módulo de fineza:				2.42

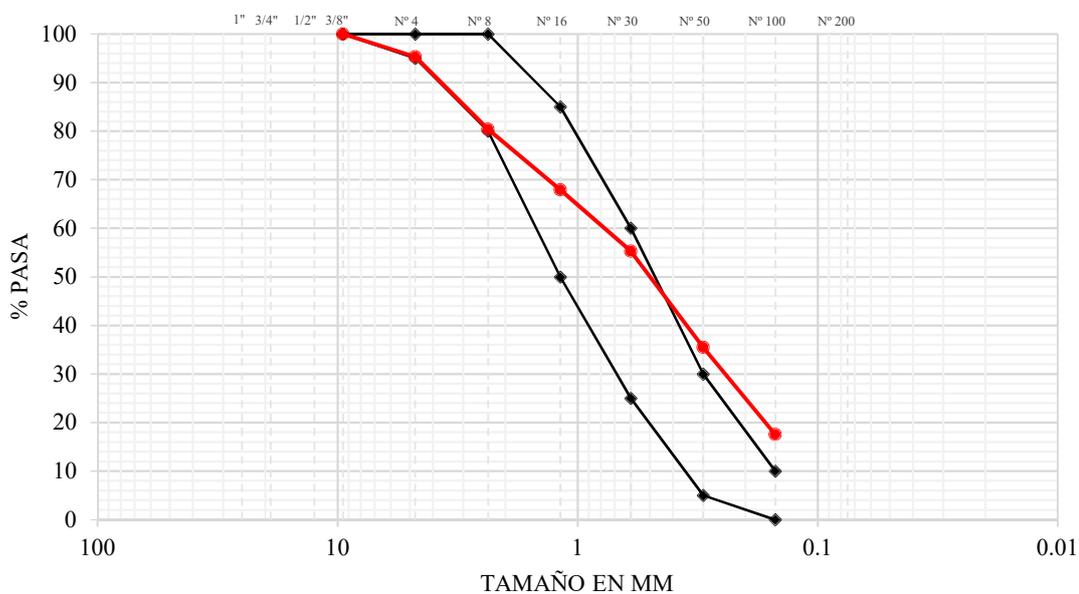
Figura B.10 Curva granulométrica del AFN tamizado N° 1



Cuadro B.20 Análisis granulométrico AFN tamizado N° 2

Tamiz		Peso retenido acumulado (g)	% Retenido acumulado	% Pasa promedio
N°	Abertura			
1"	25.00 mm	0.0	0.0	100.0
3/4"	19.00 mm	0.0	0.0	100.0
1/2"	12.50 mm	0.0	0.0	100.0
3/8"	9.50 mm	0.0	0.0	100.0
N° 4	4.75 mm	19.7	4.7	95.3
N° 8	2.36 mm	82.8	19.6	80.4
N° 16	1.18 mm	135.6	32.1	67.9
N° 30	600 μ m	189.1	44.7	55.3
N° 50	300 μ m	272.9	64.5	35.5
N° 100	150 μ m	348.8	82.5	17.5
N° 200	75 μ m	382.3	90.4	9.6
Cazoleta		423.0	100.0	0.0
Peso muestra seca inicial (g)				423.0
Peso seco menor que malla N° 200 (g):				40.7
Porcentaje de error				0.0%
Módulo de fineza				2.48

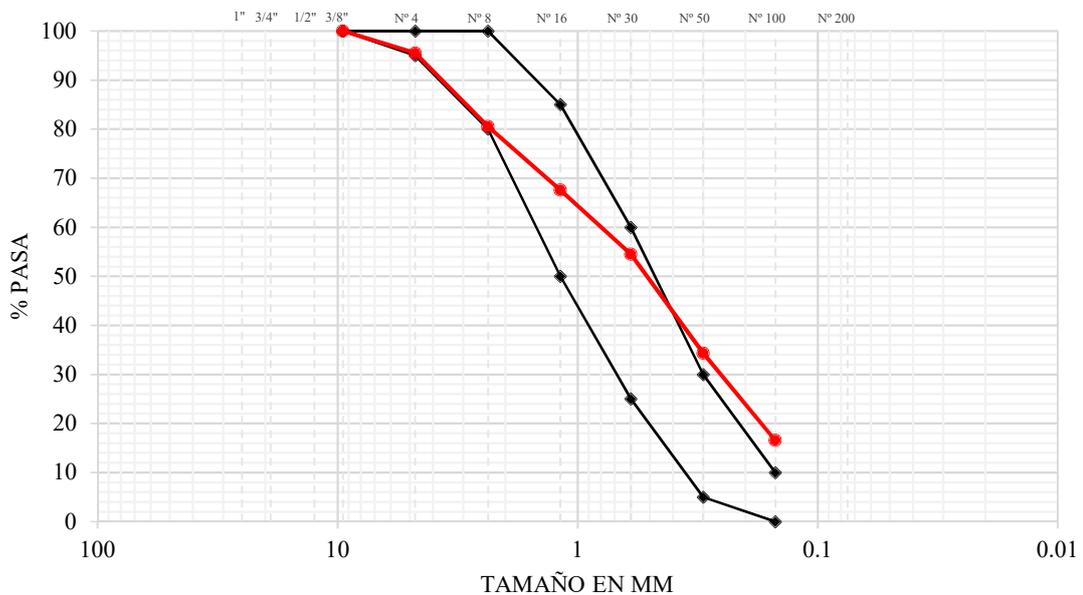
Figura B.11 Curva granulométrica del AFN tamizado N° 2



Cuadro B.21 Análisis granulométrico del AFN tamizado N° 3

Tamiz		Peso retenido acumulado (g)	% Retenido acumulado	% Pasa promedio
N°	Abertura			
1"	25.00 mm	0.0	0.0	100.0
3/4"	19.00 mm	0.0	0.0	100.0
1/2"	12.50 mm	0.0	0.0	100.0
3/8"	9.50 mm	0.0	0.0	100.0
N° 4	4.75 mm	19.6	4.5	95.5
N° 8	2.36 mm	84.4	19.5	80.5
N° 16	1.18 mm	140.7	32.4	67.6
N° 30	600 μ m	197.4	45.5	54.5
N° 50	300 μ m	285.0	65.7	34.3
N° 100	150 μ m	362.2	83.5	16.5
N° 200	75 μ m	395.8	91.2	8.8
Cazoleta		434.3	100.1	-0.1
Peso muestra seca inicial (g)				434.0
Peso seco menor que malla N° 200 (g):				38.5
Porcentaje de error				-0.1%
Módulo de fineza				2.51

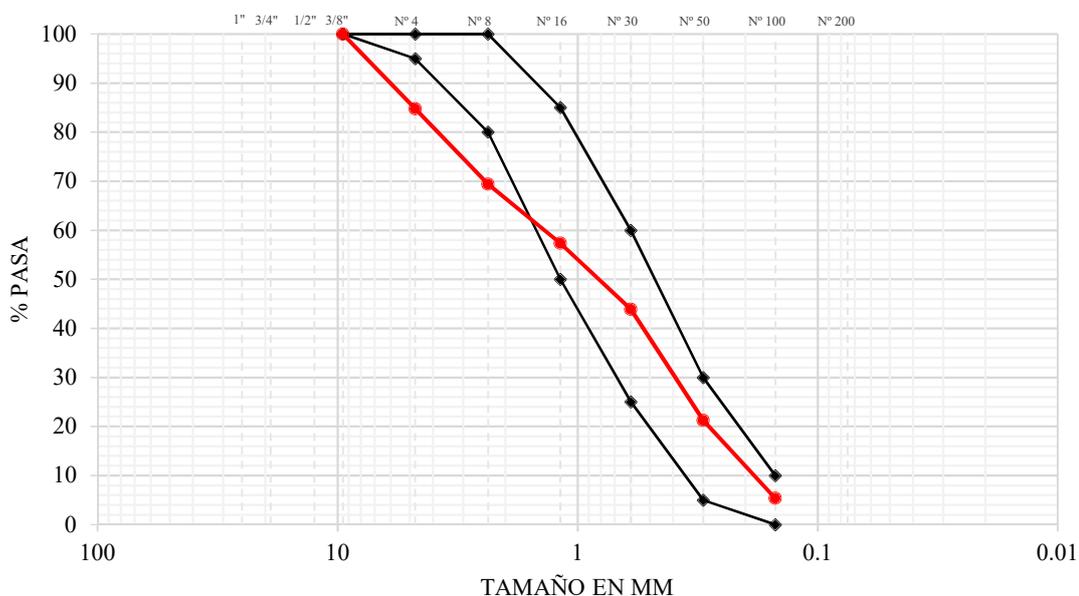
Figura B.12 Curva granulométrica del AFN tamizado N° 3



Cuadro B.22 Análisis granulométrico del AFN lavado N° 1

Tamiz		Peso retenido acumulado (g)	% Retenido acumulado	% Pasa promedio
N°	Abertura			
1"	25.00 mm	0.0	0.0	100.0
3/4"	19.00 mm	0.0	0.0	100.0
1/2"	12.50 mm	0.0	0.0	100.0
3/8"	9.50 mm	0.0	0.0	100.0
N° 4	4.75 mm	48.9	15.3	84.7
N° 8	2.36 mm	98.1	30.6	69.4
N° 16	1.18 mm	136.7	42.6	57.4
N° 30	600 μ m	179.9	56.1	43.9
N° 50	300 μ m	252.4	78.7	21.3
N° 100	150 μ m	303.4	94.7	5.3
N° 200	75 μ m	317.9	99.2	0.8
Cazoleta		321.2	100.2	-0.2
Peso muestra seca inicial (g):				320.5
Peso seco menor que malla N° 200 (g):				3.3
Porcentaje de error:				-0.2%
Módulo de fineza:				3.18

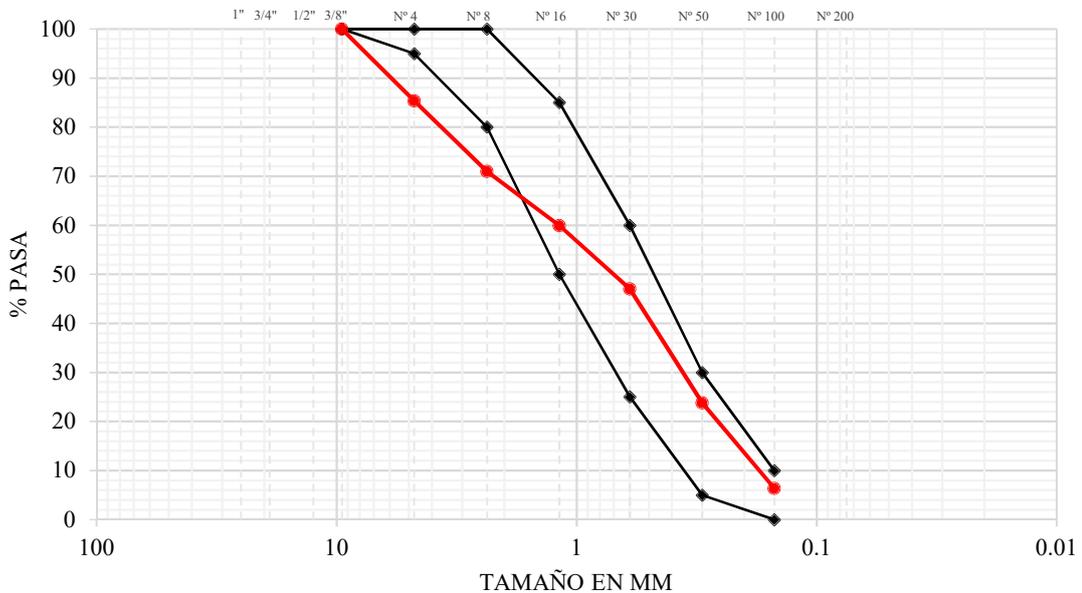
Figura B.13 Curva granulométrica del AFN lavado N° 1



Cuadro B.23 Análisis granulométrico AFN lavado N° 2

Tamiz		Peso retenido acumulado (g)	% Retenido acumulado	% Pasa promedio
N°	Abertura			
1"	25.00 mm	0.0	0.0	100.0
3/4"	19.00 mm	0.0	0.0	100.0
1/2"	12.50 mm	0.0	0.0	100.0
3/8"	9.50 mm	0.0	0.0	100.0
N° 4	4.75 mm	44.0	14.6	85.4
N° 8	2.36 mm	87.3	29.0	71.0
N° 16	1.18 mm	120.5	40.1	59.9
N° 30	600 μ m	159.3	53.0	47.0
N° 50	300 μ m	229.1	76.2	23.8
N° 100	150 μ m	281.6	93.7	6.3
N° 200	75 μ m	297.7	99.0	1.0
Cazoleta		301.2	100.2	-0.2
Peso muestra seca inicial (g)				300.7
Peso seco menor que malla N° 200 (g):				3.5
Porcentaje de error				-0.2%
Módulo de fineza				3.07

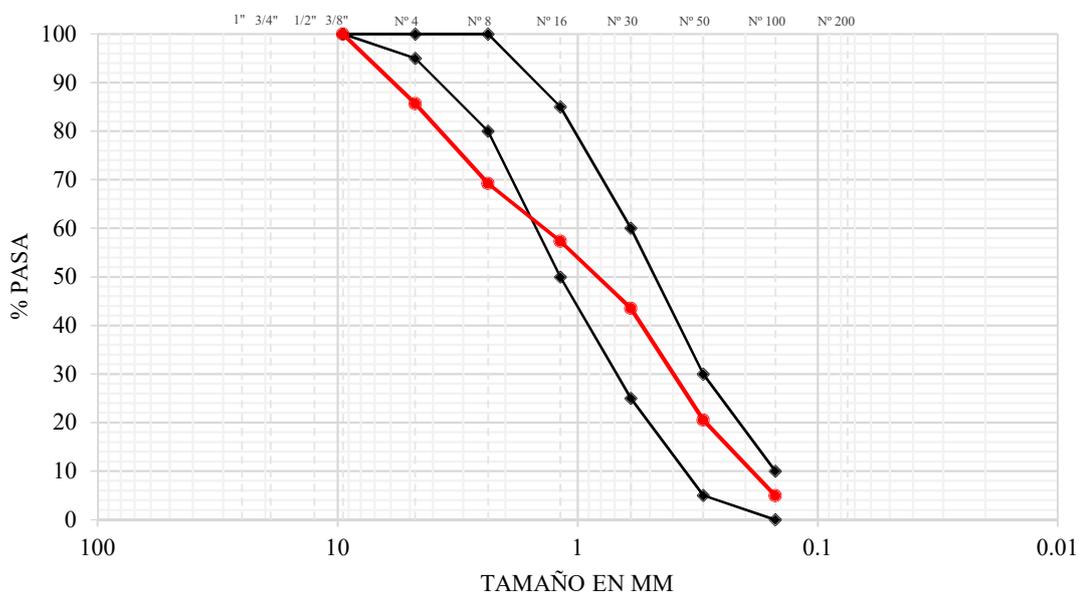
Figura B.14 Curva granulométrica del AFN lavado N° 2



Cuadro B.24 Análisis granulométrico del AFN lavado N° 3

Tamiz		Peso retenido acumulado (g)	% Retenido acumulado	% Pasa promedio
N°	Abertura			
1"	25.00 mm	0.0	0.0	100.0
3/4"	19.00 mm	0.0	0.0	100.0
1/2"	12.50 mm	0.0	0.0	100.0
3/8"	9.50 mm	0.0	0.0	100.0
N° 4	4.75 mm	46.1	14.3	85.7
N° 8	2.36 mm	98.8	30.7	69.3
N° 16	1.18 mm	137.1	42.7	57.3
N° 30	600 μ m	181.6	56.5	43.5
N° 50	300 μ m	255.5	79.5	20.5
N° 100	150 μ m	305.6	95.1	4.9
N° 200	75 μ m	318.8	99.2	0.8
Cazoleta		321.7	100.1	-0.1
Peso muestra seca inicial (g)				321.4
Peso seco menor que malla N° 200 (g):				2.9
Porcentaje de error				-0.1%
Módulo de fineza				3.19

Figura B.15 Curva granulométrica del AFN lavado N° 3



Cuadro B.25 Densidad relativa y absorción del AFN

Descripción	Unidad	M-1	M-2	M-3
1.0 Peso específico				
Masa recipiente	g	135.6	128.7	140.3
Masa SSS + recipiente	g	335.7	328.7	340.3
Masa SSS*	g	200.0	200.1	200.1
Masa muestra + canastilla sumergida	g	171.1	170.0	178.5
Masa canastilla sumergida	g	669.2	668.2	676.4
Masa aparente muestra saturada	g	793.9	793.0	801.2
Masa muestra seca + recipiente	g	332.7	326.1	337.6
Masa muestra seca	g	197.1	197.4	197.3
Temperatura del agua	°C	15.0	15.0	15.0
Densidad del agua**	kg/m3	999.1	999.1	999.1
Densidad SH*	kg/m3	2610	2620	2620
Densidad SSS	kg/m3	2650	2660	2660
Densidad aparente	kg/m3	2720	2720	2720
Peso específico (SH)		2.62	2.62	2.62
Peso específico (SSS)		2.66	2.66	2.66
Peso específico aparente		2.72	2.72	2.72
Densidad SH promedio	kg/m3		2617	
Densidad SSS promedio	kg/m3		2657	
Densidad aparente promedio	kg/m3		2720	
Peso específico (SH) promedio			2.62	
Peso específico (SSS) promedio			2.66	
Peso específico aparente promedio			2.72	
2.0 Absorción				
Masa muestra seca	g	197.1	197.4	197.3
Masa SSS	g	200.0	200.1	200.1
Absorción	%	1.5	1.3	1.4
Absorción promedio	%		1.4	

Cuadro B.26 Densidad de masa y vacíos del AFN

Descripción	Unidad	M-1	M-2	M-3
1.0 Calibración del recipiente		Resultado		
Masa placa de vidrio + recipiente	kg		3.33	
Masa placa de vidrio + recipiente + agua	kg		6.16	
Temperatura del agua	°C		15	
Densidad del agua*	kg/m3		999.11	
Masa del agua	kg		2.83	
Factor f del recipiente	1/m3		353.04	
2.0 Densidad de masa en condición suelto				
Masa del recipiente + muestra	kg	6.22	6.29	6.25
Masa del recipiente	kg	1.98	1.98	1.98
Masa de la muestra	kg	4.24	4.31	4.27
Densidad de masa suelto	kg/m3	1500	1520	1510
Densidad de masa suelto promedio	kg/m3		1510	
3.0 Densidad de masa en condición compactado				
Masa del recipiente + muestra	kg	6.65	6.72	6.75
Masa del recipiente	kg	1.98	1.98	1.98
Masa de la muestra	kg	4.67	4.74	4.77
Densidad de masa por apisonado	kg/m3	1650	1670	1680
Densidad de masa por apisonado promedio	kg/m3		1670	
4.0 Contenido de vacíos				
Peso específico de masa	kg/m3	2.62	2.62	2.62
Densidad del agua	kg/m3	998.00	998.00	998.00
Vacíos agregado compactado	%	37	36	36
Vacíos agregado suelto	%	43	42	42
Vacíos agregado compactado promedio	%		36	
Vacíos agregado suelto promedio	%		42	

Cuadro B.27 Contenido de humedad del AFN original

Descripción	Unidad	M-1	M-2	M-3
1.0 Contenido total de humedad evaporable				
Masa recipiente + muestra húmeda	g	920	997	989
Masa recipiente	g	169	167	163
Masa muestra húmeda	g	751	829	826
Masa recipiente + muestra seca	g	880	952	944
Masa muestra seca	g	711	784	781
Contenido total de humedad	%	5.7	5.7	5.8
Contenido total de humedad prom.	%		5.7	

Cuadro B.28 Contenido de humedad del AFN tamizado

Descripción	Unidad	M-1	M-2	M-3
1.0 Contenido total de humedad evaporable				
Masa recipiente + muestra húmeda	g	482	482	492
Masa recipiente	g	40	40	39
Masa muestra húmeda	g	442	442	453
Masa recipiente + muestra seca	g	464	463	473
Masa muestra seca	g	424	423	434
Contenido total de humedad	%	4.2	4.5	4.4
Contenido total de humedad prom.	%		4.4	

Cuadro B.29 Cantidad de material más fino que el tamiz de 75 μm del AFN original

Descripción	Unidad	M-1	M-2	M-3
1.0 Material mas fino que pasa por el tamiz de 75 μm (N° 200)				
Masa muestra original + recipiente	g	880	952	944
Masa recipiente	g	169	167	163
Masa muestra original	g	711	784	781
Masa muestra lavada + recipiente	g	818	885	876
Masa muestra lavada	g	649	717	712
Material más fino tamiz N° 200	%	8.7	8.5	8.8
Contenido total de humedad prom.	%		8.7	

Cuadro B.30 Cantidad de material más fino que el tamiz de 75 μm del AFN tamizado

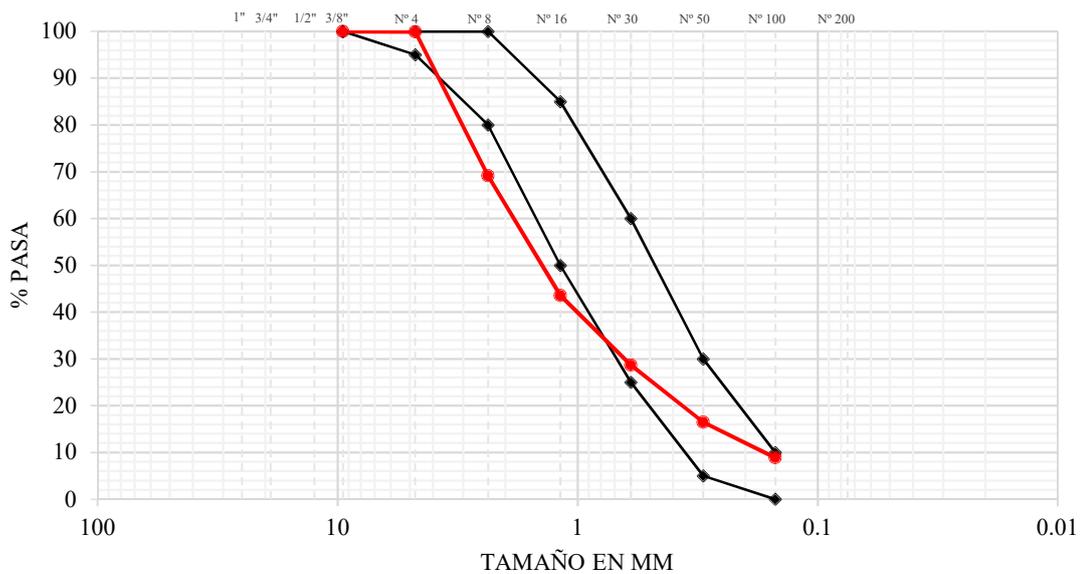
Descripción	Unidad	M-1	M-2	M-3
1.0 Material mas fino que pasa por el tamiz de 75 μm (N° 200)				
Masa muestra original + recipiente	g	464	463	473
Masa recipiente	g	40	40	39
Masa muestra original	g	424	423	434
Masa muestra lavada + recipiente	g	420	424	436
Masa muestra lavada	g	380	384	397
Material más fino tamiz N° 200	%	10.4	9.2	8.5
Contenido total de humedad prom.	%		9.4	

AGREGADO FINO RECICLADO (AFR)

Cuadro B.31 Análisis granulométrico del AFR N° 1

Tamiz		Peso retenido acumulado (g)	% Retenido acumulado	% Pasa promedio
N°	Abertura			
1"	25.00 mm	0.0	0.0	100.0
3/4"	19.00 mm	0.0	0.0	100.0
1/2"	12.50 mm	0.0	0.0	100.0
3/8"	9.50 mm	0.0	0.0	100.0
N° 4	4.75 mm	0.4	0.1	99.9
N° 8	2.36 mm	195.0	30.8	69.2
N° 16	1.18 mm	356.8	56.4	43.6
N° 30	600 μ m	450.9	71.3	28.7
N° 50	300 μ m	528.0	83.5	16.5
N° 100	150 μ m	576.2	91.1	8.9
N° 200	75 μ m	591.7	93.6	6.4
Cazoleta		631.2	99.8	0.2
Peso muestra seca inicial (g):				632.2
Peso seco menor que malla N° 200 (g):				39.5
Porcentaje de error:				0.16%
Módulo de fineza:				3.33

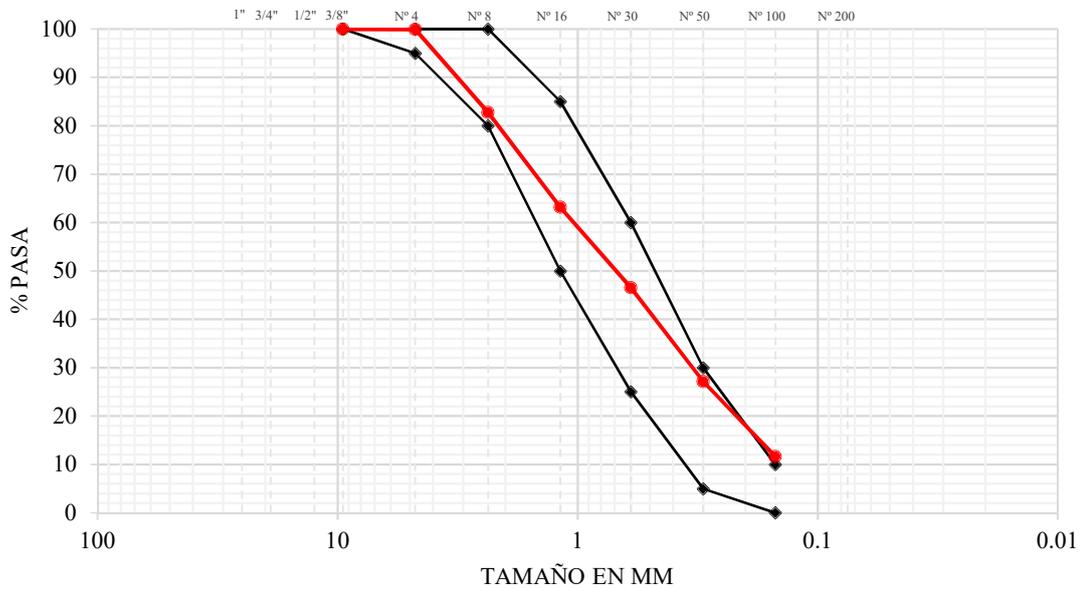
Figura B.16 Curva granulométrica del AFR N° 1



Cuadro B.32 Análisis granulométrico AFR N° 2

Tamiz		Peso retenido acumulado (g)	% Retenido acumulado	% Pasa promedio
N°	Abertura			
1"	25.00 mm	0.0	0.0	100.0
3/4"	19.00 mm	0.0	0.0	100.0
1/2"	12.50 mm	0.0	0.0	100.0
3/8"	9.50 mm	0.0	0.0	100.0
N° 4	4.75 mm	0.3	0.0	100.0
N° 8	2.36 mm	115.8	17.3	82.7
N° 16	1.18 mm	247.3	36.8	63.2
N° 30	600 μ m	359.1	53.5	46.5
N° 50	300 μ m	489.3	72.9	27.1
N° 100	150 μ m	593.1	88.4	11.6
N° 200	75 μ m	627.6	93.5	6.5
Cazoleta		670.2	99.8	0.2
Peso muestra seca inicial (g)				671.3
Peso seco menor que malla N° 200 (g):				42.6
Porcentaje de error				0.2%
Módulo de fineza				2.69

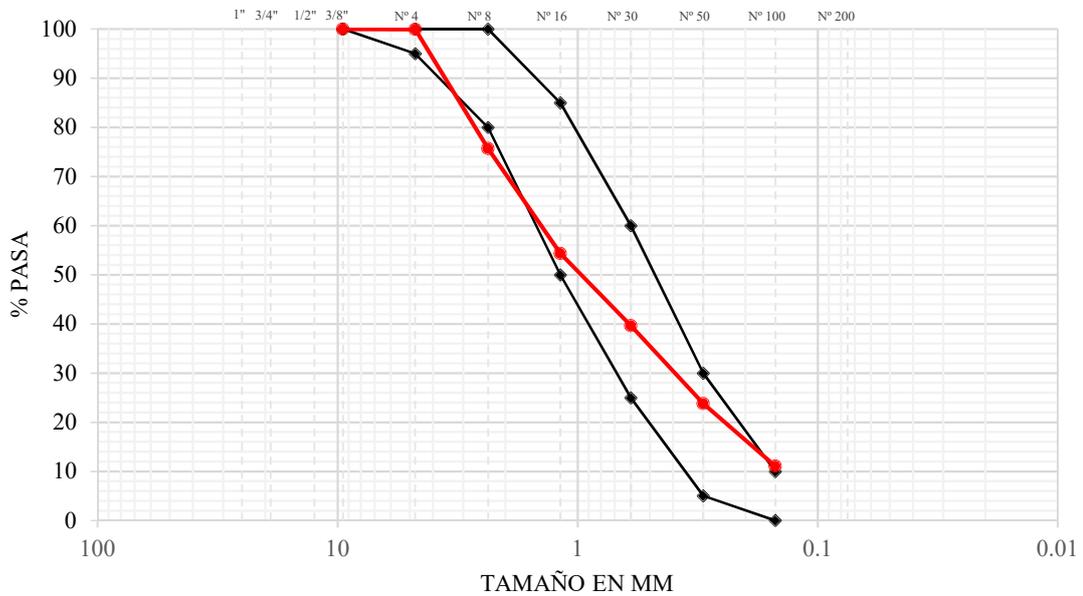
Figura B.17 Curva granulométrica del AFR N° 2



Cuadro B.33 Análisis granulométrico del AFR N° 3

Tamiz		Peso retenido acumulado (g)	% Retenido acumulado	% Pasa promedio
N°	Abertura			
1"	25.00 mm	0.0	0.0	100.0
3/4"	19.00 mm	0.0	0.0	100.0
1/2"	12.50 mm	0.0	0.0	100.0
3/8"	9.50 mm	0.0	0.0	100.0
N° 4	4.75 mm	0.5	0.1	99.9
N° 8	2.36 mm	159.2	24.3	75.7
N° 16	1.18 mm	299.2	45.6	54.4
N° 30	600 μ m	395.5	60.3	39.7
N° 50	300 μ m	499.3	76.2	23.8
N° 100	150 μ m	583.1	88.9	11.1
N° 200	75 μ m	613.5	93.6	6.4
Cazoleta		654.5	99.9	0.1
Peso muestra seca inicial (g)				655.5
Peso seco menor que malla N° 200 (g):				41.0
Porcentaje de error				0.1%
Módulo de fineza				2.95

Figura B.18 Curva granulométrica del AFR N° 3



Cuadro B.34 Densidad relativa y absorción del AFR

Descripción	Unidad	M-1	M-2	M-3
1.0 Peso específico				
Masa recipiente	g	68.8	66.3	65.7
Masa SSS + recipiente	g	269.0	267.0	265.9
Masa SSS*	g	200.2	200.7	200.2
Masa muestra + canastilla sumergida	g	171.1	170.0	178.5
Masa canastilla sumergida	g	669.2	668.2	676.4
Masa aparente muestra saturada	g	786.8	786.3	794.4
Masa muestra seca + recipiente	g	256.6	254.8	253.4
Masa muestra seca	g	187.8	188.4	187.8
Temperatura del agua	°C	15.0	15.0	15.0
Densidad del agua**	kg/m3	999.1	999.1	999.1
Densidad SH*	kg/m3	2280	2280	2280
Densidad SSS	kg/m3	2420	2430	2430
Densidad aparente	kg/m3	2680	2680	2690
Peso específico (SH)		2.27	2.28	2.28
Peso específico (SSS)		2.42	2.43	2.43
Peso específico aparente		2.68	2.68	2.69
Densidad SH promedio	kg/m3		2280	
Densidad SSS promedio	kg/m3		2427	
Densidad aparente promedio	kg/m3		2683	
Peso específico (SH) promedio			2.28	
Peso específico (SSS) promedio			2.43	
Peso específico aparente promedio			2.68	
2.0 Absorción				
Masa muestra seca	g	475.1	471.9	475.7
Masa SSS	g	504.0	500.0	504.5
Absorción	%	6.1	6.0	6.1
Absorción promedio	%		6.0	

Cuadro B.35 Densidad de masa y vacíos del AFR

Descripción	Unidad	M-1	M-2	M-3
1.0 Calibración del recipiente		Resultado		
Masa placa de vidrio + recipiente	kg		3.33	
Masa placa de vidrio + recipiente + agua	kg		6.16	
Temperatura del agua	°C		15	
Densidad del agua*	kg/m3		999.11	
Masa del agua	kg		2.83	
Factor f del recipiente	1/m3		353.04	
2.0 Densidad de masa en condición suelto				
Masa del recipiente + muestra	kg	5.63	5.61	5.68
Masa del recipiente	kg	1.98	1.98	1.98
Masa de la muestra	kg	3.65	3.63	3.70
Densidad de masa suelto	kg/m3	1290	1280	1300
Densidad de masa suelto promedio	kg/m3		1290	
3.0 Densidad de masa en condición compactado				
Masa del recipiente + muestra	kg	5.93	5.90	5.88
Masa del recipiente	kg	1.98	1.98	1.98
Masa de la muestra	kg	3.95	3.92	3.90
Densidad de masa por apisonado	kg/m3	1390	1380	1380
Densidad de masa por apisonado promedio	kg/m3		1380	
4.0 Contenido de vacíos				
Peso específico de masa	kg/m3	2.27	2.28	2.28
Densidad del agua	kg/m3	998.00	998.00	998.00
Vacíos agregado compactado	%	39	39	39
Vacíos agregado suelto	%	43	44	43
Vacíos agregado compactado promedio	%		39	
Vacíos agregado suelto promedio	%		43	

Cuadro B.36 Contenido de humedad del AFR

Descripción	Unidad	M-1	M-2	M-3
1.0 Contenido total de humedad evaporable				
Masa recipiente + muestra húmeda	g	5524	6291	2950
Masa recipiente	g	768	797	736
Masa muestra húmeda	g	4756	5494	2214
Masa recipiente + muestra seca	g	5275	5994	2834
Masa muestra seca	g	4507	5197	2098
Contenido total de humedad	%	5.5	5.7	5.6
Contenido total de humedad prom.	%		5.6	

Cuadro B.37 Cantidad de material más fino que el tamiz de 75 µm del AFN original

Descripción	Unidad	M-1	M-2	M-3
1.0 Material mas fino que pasa por el tamiz de 75 µm (N° 200)				
Masa muestra original + recipiente	g	716	743	725
Masa recipiente	g	83	72	70
Masa muestra original	g	632	671	656
Masa muestra lavada + recipiente	g	678	702	686
Masa muestra lavada	g	594.3	630	616
Material más fino tamiz N° 200	%	6.0	6.1	6.0
Contenido total de humedad prom.	%		6.0	

ANEXO C – DISEÑOS DE MEZCLA DEL CONCRETO

DISEÑO DE MEZCLA DEL CONCRETO PATRÓN

1. SELECCIÓN DE LA RESISTENCIA PROMEDIO REQUERIDA

Considerando que la mezcla de concreto tendrá excelentes condiciones en su elaboración y un exigente control de calidad, se utilizará:

$$f_{cr} = 1.2 * f_c$$

Para el presente estudio: $f_c = 250 \text{ kg/cm}^2$

Por lo que: $f_{cr} = 300 \text{ kg/cm}^2$

2. CARACTERÍSTICAS DE LOS AGREGADOS

Característica	Unidad	Natural		Reciclado	
		Fino	Grueso	Fino	Grueso
TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL	Pulgadas	-	3/4	-	3/4
MÓDULO DE FINURA		2.47	6.70	2.99	6.78
MATERIAL MÁS FINO QUE EL TAMIZ N° 200	%	9.4	-	6	1.1
RESISTENCIA A LA ABRASIÓN	%	-	28	-	44
DENSIDAD DE MASA SUELTO	kg/m ³	1510	1440	1290	1190
DENSIDAD DE MASA COMPACTADO	kg/m ³	1670	1550	1380	1290
VACÍOS AGREGADO SUELTO	%	42	45	43	49
VACÍOS AGREGADO COMPACTADO	%	36	41	39	44
PESO ESPECÍFICO DE MASA		2.62	2.64	2.28	2.31
PESO ESPECÍFICO SSS		2.66	2.66	2.43	2.43
PESO ESPECÍFICO APARENTE		2.72	2.70	2.68	2.62
ABSORCIÓN	%	1.4	0.9	6.0	5.1
CONTENIDO DE HUMEDAD (AL 19-09-17)	%	3.7	0.5	-	-
DENSIDAD DEL AGUA	kg/m ³		999.11		

3. CARACTERÍSTICAS DEL CEMENTO

- TIPO: PORTLAND TIPO I
- MARCA: PACASMAYO
- PESO ESPECÍFICO: 3.12 g/cm³
- SUPERFICIE ESPECÍFICA: 3770 cm²/g

4. DISEÑO DE MEZCLA

4.1. ASENTAMIENTO

Para el presente estudio se condisera un asentamiento de: 3" - 4" Mezcla plástica.

4.2. SELECCIÓN DEL VOLUMEN UNITARIO DE AGUA

Para un concreto sin aire incorporado, el volumen unitario de agua es: 205 l/m³.

4.3. SELECCIÓN DEL CONTENIDO DE AIRE

Para un TMN de 3/4" y sin aire incorporado el contenido de aire atrapado es: 2 %.

4.4. SELECCIÓN DE LA RELACIÓN AGUA – CEMENTO

Por resistencia, la relación agua - cemento (A/C) es: 0.55.

4.5. CÁLCULO DEL CONTENIDO DE CEMENTO

Considerando que: $Contenido\ de\ cemento = \frac{Agua}{A/C}$

Reemplazando obtenemos: Cemento = 372.73 kg/m³

$$Cemento = 8.78\ bls/m^3$$

4.6. CÁLCULO DEL VOLUMEN ABSOLUTO DE LA PASTA

La suma de los volúmenes absolutos de los elementos integrantes de la pasta serán:

Cemento:	372.73	/	3.12	/	1000	=	0.119	m ³
Agua:	205	/	1.00	/	1000	=	0.205	m ³
Aire (%):					2.00	=	<u>0.020</u>	m ³
Suma de volúmenes absolutos o volumen absoluto de la pasta						=	0.344	m ³

4.7. CÁLCULO DEL VOLUMEN ABSOLUTO DEL AGREGADO

$$\text{Volumen absoluto del agregado: } 1.000 - 0.344 = 0.656\ m^3$$

4.8. CÁLCULO DE LOS VOLÚMENES ABSOLUTOS DE LOS AGREGADOS

4.8.1. Módulo de fineza de la combinación de agregados corregido por vacíos

Nota: Los valores de tabla deben incrementarse o disminuirse en 0.1 por cada 5% de disminución o incremento en el porcentaje de vacíos (Rivva Lopez, 2014, pg. 85).

Vacíos del agregado grueso compactado, %	Tabla	35
	AGN	41
5% vacíos	0.10	
Factor de corrección	0.12	

Módulo de fineza de la combinación de agregados			
Bls/m ³	8	8.78	9
Tabla	5.11	5.17	5.19

Afectado por el factor de corrección, el Mfca corregido por vacíos es = **5.05**

4.8.2. Cálculo del porcentaje de agregado fino (r_f)

El porcentaje de agregado fino se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$r_f = \frac{m_g - m}{m_g - m_f} \times 100$$

Donde:

m: Módulo de fineza de la combinación de agregados corregido por vacíos.

mf: Módulo de fineza del agregado fino.

mg: Módulo de fineza del agregado grueso.

rf: Porcentaje de agregado fino en relación al volumen absoluto total de agregado.

rg: Porcentaje de agregado grueso en relación al volumen absoluto total de agregado.

Reemplazando obtenemos: $r_f = 38.95\%$ $r_g = 61.05\%$

4.8.3. Cálculo de los volúmenes absolutos del agregado

Volumen absoluto del agregado fino: $0.656 \times 38.95\% = 0.255 \text{ m}^3$

Volumen absoluto del agregado grueso: $0.656 - 0.255 = 0.400 \text{ m}^3$

4.9. CÁLCULO DE LOS PESOS SECOS DE LOS AGREGADOS

Peso seco del agregado fino: $1000 \times 0.255 \times 2.62 = 669 \text{ kg/m}^3$

Peso seco del agregado grueso: $1000 \times 0.400 \times 2.64 = 1057 \text{ kg/m}^3$

4.10. VALORES DE DISEÑO EN ESTADO SECO

La cantidad de materiales calculadas por el Método de Fineza de la Combinación de Agregados a ser empleados como valores de diseño serán las siguientes:

Cemento:	373	kg/m ³
Agua de diseño:	205	l/m ³
Agregado fino seco:	669	kg/m ³
Agregado grueso seco:	1057	kg/m ³

4.11. CORRECCIÓN DEL DISEÑO POR HUMEDAD DEL AGREGADO

Peso húmedo del agregado fino:	669	x	1.037	=	694	kg/m ³
Peso húmedo del agregado grueso:	1057	x	1.005	=	1063	kg/m ³

4.12. HUMEDAD SUPERFICIAL DEL AGREGADO

Humedad superficial del agregado fino:	3.7	-	1.4	=	2.3	%
Humedad superficial del agregado grueso:	0.5	-	0.9	=	-0.4	%

4.13. APORTES DE HUMEDAD DE LOS AGREGADOS

Agregado fino:	669	x	0.023	=	16	l/m ³
Agregado grueso:	1057	x	-0.004	=	-5	l/m ³
Aporte de humedad del agregado:					11	l/m ³
Agua efectiva:	205	-	11	=	194	l/m ³

4.14. PESOS DE LOS MATERIALES DE LA UNIDAD CÚBICA DE CONCRETO CORREGIDOS POR HUMEDAD DEL AGREGADO

Cemento:	373	kg/m ³
Agua de diseño:	194	l/m ³
Agregado fino seco:	694	kg/m ³
Agregado grueso seco:	1063	kg/m ³

4.15. PROPORCIÓN EN PESO

$\frac{373}{373}$:	$\frac{694}{373}$:	$\frac{1063}{373}$	
1	:	1.86	:	2.85	22.1 l/bls

4.16. CANTIDAD DE MATERIALES CORREGIDOS POR HUMEDAD POR TANDA DE UNA BOLSA DE CEMENTO

Relación agua/cemento de diseño:	205	/	372.73	=	0.55
Relación agua/cemento de efectiva:	194	/	372.73	=	0.52

4.17. MATERIALES CORREGIDOS POR HUMEDAD PARA UNA TANDA DE 0.02 m³ (VOLUMEN APROXIMADO DE 3 TESTIGOS DE CONCRETO)

Cemento:	373	x	0.02	=	7.5	kg/td
Agua efectiva:	194	x	0.02	=	3.9	l/td
Agregado fino húmedo:	694	x	0.02	=	13.9	kg/td
Agregado grueso húmedo:	1063	x	0.02	=	21.3	kg/td
Peso por tanda:				=	46.6	kg/td

AJUSTE DE LAS PROPORCIONES DE DISEÑO POR AGUA ADICIONAL, ASENTAMIENTO, CONTENIDO DE AIRE Y APARIENCIA

1. PROPORCIÓN DE MATERIALES POR METRO CÚBICO

	Diseño	Corregido por humedad	
- Cemento:	373	373	kg/m ³
- Agua:	205	194	l/m ³
- Agregado fino:	669	694	kg/m ³
- Agregado grueso:	1057	1063	kg/m ³
	Fino	Grueso	
- Absorción, %:	1.4	0.9	
- Humedad, %:	3.7	0.5	

2. CARACTERÍSTICAS OBTENIDAS EN LABORATORIO DEL CONCRETO FRESCO

- Apariencia:	Ligeramente sobregravosa		
- Asentamiento:	3.5	pulgadas	≈ 8.89 cm
- Agua adicional:	300	ml	
- Peso unitario del concreto fresco*:	2347	kg/m ³	
*Valor obtenido al determinar el porcentaje del aire atrapado por el método de presión.			
- Aire atrapado, % (Medido en laboratorio método de presión)	=	1.2	%
- Temperatura del concreto fresco (Medido en laboratorio)	=	18.5	°C

3. PROPORCIÓN DE MATERIALES POR TANDA DE ENSAYO (0.02 m³)

La tanda para un volumen de 0.02 m³ con la corrección de agua efectuada es la siguiente:

- Cemento:	373	x	0.02	=	7.5	kg/td
- Agua añadida:	3.9	+	0.30	=	4.2	L/td
- Agregado fino húmedo:	694	x	0.02	=	13.9	kg/td
- Agregado grueso húmedo:	1063	x	0.02	=	<u>21.3</u>	kg/td
- Peso por tanda:				=	46.9	kg/td

4. RENDIMIENTO DE LA TANDA DE ENSAYO

- Rendimiento:	46.90	/	2347	=	0.0200	m ³ /td
----------------	-------	---	------	---	--------	--------------------

5. AGUA DE MEZCLADO POR TANDA

La nueva cantidad de agua de mezclado por tanda es como sigue:

Humedad superficial del:

- Agregado fino:	3.7	-	1.4	=	2.3	%
- Agregado grueso:	0.5	-	0.9	=	-0.4	%
- Agua añadida:				=	4.20	l/td
- Aporte del fino húmedo:	0.02	x	669	x	0.023	= 0.31 l/td
- Aporte del grueso húmedo:	0.02	x	1057	x	-0.004	= <u>-0.08</u> l/td
- Agua de mezclado por tanda:				=	4.43	l/td

6. AGUA DE MEZCLADO REQUERIDA

La cantidad de agua de mezclado requerida por m³ de concreto y con el mismo asentamiento de la tanda de ensayo se obtendrá dividiendo el agua de mezclado por tanda entre el rendimiento de la tanda de ensayo:

- Agua de mezclado:	4.43	/	0.0200	=	221.50	l/m ³
---------------------	------	---	--------	---	--------	------------------

7. CORRECCIÓN EN EL AGUA DE MEZCLADO POR ASENTAMIENTO Y CONTENIDO DE AIRE

7.1. CORRECCIÓN POR ASENTAMIENTO

Considerando que la cantidad de agua requerida por metro cúbico de concreto deberá ser incrementada en 2 litros por cada incremento de 1 cm hasta obtener el asentamiento deseado, se tiene:

- Asentamiento deseado	3.54	pulgadas	≈	9.00	cm
- Asentamiento obtenido	3.5	pulgadas	≈	8.89	cm
- Incremento del asentamiento			=	0.11	cm
- Incremento del agua de mezcla			=	0.22	l/m ³
- Nueva agua de mezclado	221.50	+	0.22	=	222.0 l/m ³

7.2. CORRECCIÓN POR CONTENIDO DE AIRE

(El agua de mezclado deberá ser reducida o incrementada en 3 litros por metro cúbico por cada 1% del contenido de aire que se incrementa o disminuye)

- Contenido de aire deseado			=	2	%
- Contenido de aire obtenido			=	1.2	%
- Incremento del contenido de aire:	2	-	1.2	=	0.8 %
- Disminución del agua de mezclado:	3	x	0.8	=	2.4 l/m ³
- Nueva agua de mezclado:	222.0	-	2.4	=	219.6 l/m ³

8. NUEVO CONTENIDO DE CEMENTO

La relación agua/cemento de diseño: $A/C = 0.55$

Con el incremento en la cantidad de agua de mezclado, se requiere cemento adicional para mantener la relación agua/cemento de diseño.

- Contenido de cemento $Cemento = 399.27 \text{ kg/m}^3$

9. VOLUMEN ABSOLUTO DE LA PASTA

Conocidos los nuevos contenidos de cemento, agua y aire, se determina el volumen absoluto de la pasta y por diferencia con la unidad el volumen absoluto de agregados:

Cemento:	399.27	/	3.12	/	1000	=	0.128	m ³
Agua:	222.00	/	1.00	/	1000	=	0.222	m ³
Aire (%):					2.00	=	0.020	m ³
Volumen absoluto de la pasta						=	0.370	m ³
Volumen absoluto del agregado	1	-	0.370	=			0.630	m ³

10. CORRECCIÓN EN EL AGREGADO GRUESO (APARIENCIA)

Desde que el concreto fue encontrado ligeramente sobregravoso, la cantidad de agregado grueso por unidad de volumen fue disminuida solamente en 2% para mejorar la trabajabilidad y no en 10% tal como lo recomienda el Método del Comité 211 del ACI,

considerando que la cantidad de agregado grueso calculada utilizando la relación b/b0 (62%) es mayor que la del diseño original (61%) utilizando el Método de la combinación de agregados. En este sentido, no se justifica utilizar el Método del Comité 211 del ACI para corregir la cantidad de agregado grueso.

- De diseño se tiene: $r_g = 61.05\%$
- Factor de corrección: 10%
- % Agregado grueso r_g corregido $\text{nuevo } r_g = 51.05\%$

11. VOLUMEN ABSOLUTO DE LOS AGREGADOS

- Agregado grueso: $0.630 \times 51.05\% = 0.322 \text{ m}^3$
- Agregado fino: $0.630 - 0.322 = 0.308 \text{ m}^3$

12. CÁLCULO DE LOS PESOS SECOS DE LOS AGREGADOS

- Peso seco del agregado fino: $1000 \times 0.308 \times 2.62 = 808 \text{ kg/m}^3$
- Peso seco del agregado grueso: $1000 \times 0.322 \times 2.64 = 851 \text{ kg/m}^3$

13. MATERIALES CORREGIDOS

Cemento:	399	kg/m³
Agua corregida:	222	l/m³
Agregado fino seco:	808	kg/m³
Agregado grueso seco:	851	kg/m³

AJUSTE DE LAS PROPORCIONES DE DISEÑO POR RESISTENCIA

1. RESISTENCIA PROMEDIO DE LOS ESPECÍMENES A LOS 7 DÍAS

Especímen	Edad (d)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)
1	7	270
2	7	266
3	7	273
Promedio		270

2. RESISTENCIA PROBABLE A LOS 28 DÍAS

Considerando que la resistencia a los 28 días debe estar en una relación de 1.33 con la resistencia a los 7 días, la resistencia probable a los 28 días debe ser:

$$\text{Resistencia probable a los 28 días (S): } 270 \quad \times \quad 1.33 \quad = \quad 359 \quad \text{kg/cm}^2$$

3. GRADO DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO (α)

Considerando la relación agua/cemento del diseño original (a/c): 0.55, el grado de hidratación del cemento (α) se puede determinar por medio de la Ley de Powers:

$$S = 2380x^3; \text{ siendo } x = \frac{0.647\alpha}{0.319\alpha + a/c}$$

Donde:

S: Resistencia del concreto a los 28 días, kg/cm².

x: Relación gel/espacio.

α : Grado de hidratación del cemento.

A/C: Relación agua - cemento.

$$\text{Grado de hidratación del cemento} \quad \alpha \quad = \quad 0.61$$

4. RELACIÓN AGUA/CEMENTO CORREGIDA POR HIDRATACIÓN

- Grado de hidratación del cemento: $\alpha = 0.61$
- Resistencia del concreto deseada a los 28 días (S_1): $S_1 = 250 \quad \text{kg/cm}^2$
- Nueva relación agua/cemento corregida por hidratación: $A/C = 0.65$

5. NUEVOS MATERIALES CORREGIDOS POR RESISTENCIA

Cemento:	341	kg/m ³
Agua corregida:	222	l/m ³
Agregado fino seco:	831	kg/m ³
Agregado grueso seco:	876	kg/m ³

6. CORRECCIÓN POR HUMEDAD DE LOS AGREGADOS CORREGIDOS POR RESISTENCIA

6.1. MATERIALES DE DISEÑO

Cemento:	341	kg/m ³
Agua corregida:	222	l/m ³
Agregado fino seco:	831	kg/m ³
Agregado grueso seco:	876	kg/m ³

	Fino	Grueso
- Absorción, %:	1.4	0.9
- Humedad, %:	8.4	1

6.2. HUMEDAD SUPERFICIAL DEL AGREGADO

- Del agregado fino:	8.4%	-	1.4%	=	7.0%
- Del agregado grueso:	1.0%	-	0.9%	=	0.1%

6.3. APORTES DE HUMEDAD DE LOS AGREGADOS

- Agregado fino:	831	x	7.0%	=	59	l/m ³
- Agregado grueso:	876	x	0.1%	=	1	l/m ³
- Aporte de humedad del agregado:					60	l/m ³
- Agua efectiva:	222	-	60	=	162	l/m ³

6.4. MATERIALES CORREGIDOS POR HUMEDAD DEL AGREGADO

- Cemento:	341	kg/m ³	=	8.02	bls/m ³
- Agua efectiva:	162	l/m ³			
- Agregado fino húmedo:	833	kg/m ³			
- Agregado grueso húmedo:	876	kg/m ³			

6.5. PROPORCIÓN EN PESO

$\frac{341}{341}$:	$\frac{833}{341}$:	$\frac{876}{341}$
-------------------	---	-------------------	---	-------------------

1	:	2.44	:	2.57		153	l/bls
---	---	------	---	------	--	-----	-------

6.6. CANTIDAD DE MATERIALES CORREGIDOS POR HUMEDAD POR TANDA DE UNA BOLSA DE CEMENTO

- Relación agua/cemento de diseño:	222	/	340.77	=	0.65
- Relación agua/cemento de efectiva:	162	/	340.77	=	0.47

Y la cantidad de materiales por tanda de una bolsa serán:

- Cemento:	1	x	42.5	=	42.5	kg/bls
- Agua efectiva:				=	153.5	l/bls
- Agregado fino húmedo:	2.44	x	42.5	=	103.7	kg/bls
- Agregado grueso húmedo:	2.57	x	42.5	=	109.3	kg/bls
- Peso por tanda:				=	409.0	kg/bls

6.7. MATERIALES CORREGIDOS POR HUMEDAD PARA UNA TANDA DE
0.02 m³ (VOLUMEN APROXIMADO DE 3 TESTIGOS DE CONCRETO)

- Cemento:	341	x	0.02	=	6.8	kg/td
- Agua efectiva:	162	x	0.02	=	3.2	l/td
- Agregado fino húmedo:	833	x	0.02	=	16.7	kg/td
- Agregado grueso húmedo:	876	x	0.02	=	17.5	kg/td
- Peso por tanda:				=	44.2	kg/td

6.8. MATERIALES CORREGIDOS POR HUMEDAD PARA UNA TANDA DE
0.04 m³ (VOLUMEN APROXIMADO DE 6 TESTIGOS DE CONCRETO)

- Cemento:	341	x	0.04	=	13.6	kg/td
- Agua efectiva:	162	x	0.04	=	6.5	l/td
- Agregado fino húmedo:	833	x	0.04	=	33.3	kg/td
- Agregado grueso húmedo:	876	x	0.04	=	35.0	kg/td
- Peso por tanda:				=	88.5	kg/td

DISEÑO DE MEZCLA DEL CONCRETO PATRÓN CORREGIDO EL

MÓDULO DE FINURA DEL AGREGADO FINO NATURAL

1. ASENTAMIENTO

Para el presente estudio se consideró un asentamiento de: 3" - 4" Mezcla plástica.

2. SELECCIÓN DEL VOLUMEN UNITARIO DE AGUA

Para un concreto sin aire incorporado, el volumen unitario de agua es: 222 l/m³.

3. SELECCIÓN DEL CONTENIDO DE AIRE

Para un TMN de 3/4" y sin aire incorporado el contenido de aire atrapado es: 2 %.

4. SELECCIÓN DE LA RELACIÓN AGUA – CEMENTO

Por resistencia, la relación agua - cemento (A/C) es: 0.65.

5. CÁLCULO DEL CONTENIDO DE CEMENTO

Considerando que: $Contenido\ de\ cemento = \frac{Agua}{A/C}$

Reemplazando obtenemos: $Cemento = 341\ kg/m^3$

$Cemento = 8.02\ bls/m^3$

6. CÁLCULO DEL VOLUMEN ABSOLUTO DE LA PASTA

La suma de los volúmenes absolutos de los elementos integrantes de la pasta serán:

Cemento:	341	/	3.12	/	1000	=	0.109	m ³
Agua:	222	/	1.00	/	1000	=	0.222	m ³
Aire (%):					2.00	=	<u>0.020</u>	m ³
Suma de volúmenes absolutos o volumen absoluto de la pasta						=	0.351	m ³

7. CÁLCULO DEL VOLUMEN ABSOLUTO DEL AGREGADO

$$\text{Volumen absoluto del agregado: } 1.000 - 0.351 = 0.649 \text{ m}^3$$

8. CÁLCULO DE LOS VOLUMENES ABSOLUTOS DE LOS AGREGADOS

8.1. MÓDULO DE FINEZA DE LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS CORREGIDO POR VACÍOS

Nota: Los valores de tabla deben incrementarse o disminuirse en 0.1 por cada 5% de disminución o incremento en el porcentaje de vacíos (Rivva Lopez, 2014, pg. 85).

Vacíos del agregado grueso compactado, %	Tabla	35
	AGN	41
5% vacíos	0.10	
Factor de corrección	0.12	

Módulo de fineza de la combinación de agregados			
Bls/m ³	8	8.02	9
Tabla	5.11	5.11	5.19

Afectado por el factor de corrección, el Mfca corregido por vacíos es = **4.99**

8.2. CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE AGREGADO FINO (r_f)

El porcentaje de agregado fino se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$r_f = \frac{m_g - m}{m_g - m_f} \times 100$$

Donde:

m: Módulo de fineza de la combinación de agregados corregido por vacíos.

mf: Módulo de fineza del agregado fino.

mg: Módulo de fineza del agregado grueso.

rf: Porcentaje de agregado fino en relación al volumen absoluto total de agregado.

rg: Porcentaje de agregado grueso en relación al volumen absoluto total de agregado.

Reemplazando obtenemos: $r_f = 48.12\%$ $r_g = 51.88\%$

8.3. CÁLCULO DE LOS VOLUMENES ABSOLUTOS DEL AGREGADO

Volumen absoluto del agregado fino: $0.649 \times 48.12\% = 0.312 \text{ m}^3$

Volumen absoluto del agregado grueso: $0.649 - 0.312 = 0.337 \text{ m}^3$

9. CÁLCULO DE LOS PESOS SECOS DE LOS AGREGADOS

Peso seco del agregado fino: $1000 \times 0.312 \times 2.62 = 818 \text{ kg/m}^3$

Peso seco del agregado grueso: $1000 \times 0.337 \times 2.64 = 889 \text{ kg/m}^3$

10. VALORES DE DISEÑO EN ESTADO SECO

La cantidad de materiales calculadas por el Método de Fineza de la Combinación de Agregados a ser empleados como valores de diseño serán las siguientes:

Cemento: **341** kg/m^3

Agua de diseño: **222** l/m^3

Agregado fino seco: **818** kg/m^3

Agregado grueso seco: **889** kg/m^3

11. CORRECCIÓN DEL DISEÑO POR HUMEDAD DEL AGREGADO

Peso húmedo del agregado fino: $818 \times 1.095 = 896 \text{ kg/m}^3$

Peso húmedo del agregado grueso: $889 \times 1.012 = 900 \text{ kg/m}^3$

12. HUMEDAD SUPERFICIAL DEL AGREGADO

Humedad superficial del agregado fino: $9.5 - 1.4 = 8.1 \%$

Humedad superficial del agregado grueso: $1.2 - 0.9 = 0.3 \%$

13. APORTES DE HUMEDAD DE LOS AGREGADOS

Agregado fino:	818	x	0.081	=	67	l/m ³
Agregado grueso:	889	x	0.003	=	3	l/m ³
Aporte de humedad del agregado:					<u>70</u>	l/m ³
Agua efectiva:	222	-	70	=	152	l/m ³

14. PESOS DE LOS MATERIALES DE LA UNIDAD CÚBICA DE CONCRETO CORREGIDOS POR HUMEDAD DEL AGREGADO

Cemento:	341	kg/m ³
Agua de diseño:	152	l/m ³
Agregado fino seco:	896	kg/m ³
Agregado grueso seco:	900	kg/m ³

15. PROPORCIÓN EN PESO

$\frac{341}{341}$:	$\frac{896}{341}$:	$\frac{900}{341}$	
1	:	2.63	:	2.64	19 l/bls

16. CANTIDAD DE MATERIALES CORREGIDOS POR HUMEDAD POR TANDA DE UNA BOLSA DE CEMENTO

Relación agua/cemento de diseño:	222	/	340.77	=	0.65
Relación agua/cemento de efectiva:	152	/	340.77	=	0.45

Y las cantidades de materiales por tanda de una bolsa serán:

Cemento:	1	x	42.5	=	42.5	kg/bls
Agua efectiva:				=	19.0	l/bls
Agregado fino húmedo:	2.63	x	42.5	=	111.8	kg/bls
Agregado grueso húmedo:	2.64	x	42.5	=	<u>112.2</u>	kg/bls
Peso por tanda:				=	285.5	kg/bls

17. MATERIALES CORREGIDOS POR HUMEDAD PARA UNA TANDA DE 0.02 m³ (VOLUMEN APROXIMADO DE 3 TESTIGOS DE CONCRETO)

Cemento:	341	x	0.02	=	6.8	kg/td
Agua efectiva:	152	x	0.02	=	3.0	l/td
Agregado fino húmedo:	896	x	0.02	=	17.9	kg/td
Agregado grueso húmedo:	900	x	0.02	=	<u>18.0</u>	kg/td
Peso por tanda:				=	45.7	kg/td

DISEÑO DE MEZCLA DEL CONCRETO REEMPLAZANDO EL AGREGADO NATURAL POR AGREGADO RECICLADO AL 20%

1. ESPECIFICACIONES DEL DISEÑO PATRÓN

Las proporciones de los materiales corregidos son los siguientes:

	Diseño	Corregido por humedad			
- Cemento:	341	341	kg/m ³	=	8.0 bls/m ³
- Agua:	222	162	l/m ³		
- Agregado fino:	831	833	kg/m ³		
- Agregado grueso:	876	876	kg/m ³		
- Contenido de aire:	2	%			
- Relación A/C corregida:	0.65				

2. ESPECIFICACIONES DEL DISEÑO PATRÓN

Conocido el contenido de cemento, agua y aire, se determina el volumen absoluto de la pasta y por diferencia con la unidad, el volumen absoluto del agregado total:

- Cemento:	340.77	/	3.12	/	1000	=	0.109 m ³
- Agua:	221.50	/	1.00	/	1000	=	0.222 m ³
- Aire (%):					2.00	=	<u>0.020</u> m ³
- Volumen absoluto de la pasta:						=	0.351 m ³
- Volumen absoluto del agregado:	1	-	0.351			=	0.649 m ³

3. CÁLCULO DE LOS VOLUMENES ABSOLUTOS DE LOS AGREGADOS

3.1. CÁLCULO DEL MÓDULO DE FINEZA DE LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS CORREGIDO POR VACÍOS

Nota: Los valores de tabla deben incrementarse o disminuirse en 0.1 por cada 5% de disminución o incremento en el porcentaje de vacíos a partir de 35%.

Vacíos del agregado grueso compactado, %	AGN	AGR
5% vacíos	41	44
PR del agregado, %	80%	20%
Factor de corrección	0.096	0.036
Factor de corrección total	0.132	

De tabla, se tiene que el Mfc para 8.0 bls/m³ es: 5.11

Afectado por el factor de corrección, el Mfca corregido por vacíos es = **4.98**

3.2. CÁLCULO DE LOS PORCENTAJE DE AGREGADO NATURAL Y RECICLADO

Utilizando la siguiente ecuación, se determinan los porcentajes de agregado fino natural y fino reciclado afectados por los PR del agregado correspondientes.

$$r_f = \frac{m_g - m}{m_g - m_f} \times 100$$

Donde:

m: Módulo de fineza de la combinación de agregados corregido por vacíos.

mf: Módulo de fineza del agregado fino.

mg: Módulo de fineza del agregado grueso.

rf: % de agregado fino en relación al volumen absoluto total de agregado.

rg: % de agregado grueso en relación al volumen absoluto total de agregado.

Reemplazando obtenemos:

- r _f natural:	80%	x	48.51%	=	38.81%
- r _g natural:	80%	-	38.81%	=	41.19%
- r _f reciclado:	20%	x	47.55%	=	9.51%
- r _g reciclado:	20%	-	9.51%	=	10.49%

3.3. CÁLCULO DE LOS VOLUMENES ABSOLUTOS DEL AGREGADO

- Agregado fino natural:	0.649	x	38.81%	=	0.252 m ³
- Agregado grueso natural:	0.649	x	41.19%	=	0.267 m ³
- Agregado fino reciclado:	0.649	x	9.51%	=	0.062 m ³
- Agregado grueso reciclado:	0.649	x	10.49%	=	0.068 m ³

4. CÁLCULO DE LOS PESOS SECOS DE LOS AGREGADOS

- Agregado fino natural:	1000	x	0.252	x	2.62	=	661 kg/m ³
- Agregado grueso natural:	1000	x	0.267	x	2.64	=	707 kg/m ³
- Agregado fino reciclado:	1000	x	0.062	x	2.28	=	141 kg/m ³

$$\text{-Agregado grueso reciclado: } 1000 \quad \times \quad 0.068 \quad \times \quad 2.31 \quad = \quad 158 \quad \text{kg/m}^3$$

5. VALORES DE DISEÑO EN ESTADO SECO AL 20% DEL PR

La cantidad de materiales calculadas por el Método de Fineza de la Combinación de Agregados a ser empleados como valores de diseño serán las siguientes:

- Cemento:	341	kg/m ³
- Agua de diseño:	222	l/m ³
- Agregado fino natural seco:	661	kg/m ³
- Agregado fino reciclado seco:	141	kg/m ³
- Agregado grueso natural seco:	707	kg/m ³
- Agregado grueso reciclado seco:	158	kg/m ³

6. CORRECCIÓN DEL DISEÑO POR HUMEDAD DEL AGREGADO

- Peso húmedo del fino natural:	661	x	1.095	=	724	kg/m ³
- Peso húmedo del fino reciclado:	141	x	1.110	=	157	kg/m ³
- Peso húmedo del grueso natural:	707	x	1.012	=	716	kg/m ³
- Peso húmedo del grueso reciclado:	158	x	1.052	=	167	kg/m ³

7. HUMEDAD SUPERFICIAL DEL AGREGADO

- Del agregado fino natural:	9.5	-	1.4	=	8.1	%
- Del agregado fino reciclado:	11.0	-	6.0	=	5.0	%
- Del agregado grueso natural:	1.2	-	0.9	=	0.3	%
- Del agregado grueso reciclado:	5.2	-	5.1	=	0.1	%

8. APORTES DE HUMEDAD DE LOS AGREGADOS

- Agregado fino natural:	661	x	0.081	=	54	l/m ³
- Agregado fino reciclado:	141	x	0.05	=	8	l/m ³
- Agregado grueso natural:	707	x	0.003	=	3	l/m ³
- Agregado grueso reciclado:	158	x	0.001	=	1	l/m ³
- Aporte de humedad del agregado:					<u>66</u>	l/m ³
- Agua efectiva:	222	-	66	=	155.5	l/m ³

9. PESOS DE LOS MATERIALES DE LA UNIDAD CÚBICA DE CONCRETO CORREGIDOS POR HUMEDAD DEL AGREGADO

- Cemento:	341	kg/m ³
- Agua de diseño:	156	l/m ³

- Agregado fino natural seco:	724	kg/m ³
- Agregado fino reciclado seco:	157	kg/m ³
- Agregado grueso natural seco:	716	kg/m ³
- Agregado grueso reciclado seco:	167	kg/m ³

10. PROPORCIÓN EN PESO

- Cemento:	341	/	341	=	1
- Agua efectiva:	156	/	8	=	19.4 l/bls
- Agregado fino natural húmedo:	724	/	341	=	2.1
- Agregado fino reciclado húmedo:	157	/	341	=	0.5
- Agregado grueso natural húmedo:	716	/	341	=	2.1
- Agregado grueso reciclado húmedo:	167	/	341	=	0.5

11. CANTIDAD DE MATERIALES CORREGIDOS POR HUMEDAD POR TANDA DE UNA BOLSA DE CEMENTO

Relación agua/cemento de diseño:	222	/	340.77	=	0.65
Relación agua/cemento de efectiva:	156	/	340.77	=	0.46

Y la cantidad de materiales por tanda de una bolsa serán:

- Cemento:	1	x	42.5	=	42.5 kg/bls
- Agua efectiva:				=	19.4 l/bls
- Agregado fino natural húmedo:	2.1	x	42.5	=	89.3 kg/bls
- Agregado fino reciclado húmedo:	0.5	x	42.5	=	21.3 kg/bls
- Agregado grueso natural húmedo:	2.1	x	42.5	=	89.3 kg/bls
- Agregado grueso reciclado húmedo:	0.5	x	42.5	=	21.3 kg/bls
- Peso por tanda:				=	283.1 kg/bls

12. MATERIALES CORREGIDOS POR HUMEDAD PARA UNA TANDA DE 0.02 M3 (VOLUMEN APROXIMADO DE 3 TESTIGOS DE CONCRETO)

- Cemento:	341	x	0.02	=	6.8 kg/td
- Agua efectiva:	156	x	0.02	=	3.1 l/td
- Agregado fino natural húmedo:	724	x	0.02	=	14.5 kg/td
- Agregado fino reciclado húmedo:	157	x	0.02	=	3.1 kg/td
- Agregado grueso natural húmedo:	716	x	0.02	=	14.3 kg/td
- Agregado grueso reciclado húmedo:	167	x	0.02	=	3.3 kg/td
- Peso por tanda:				=	<u>45.1</u> kg/td

DISEÑO DE MEZCLA DEL CONCRETO REEMPLAZANDO EL AGREGADO NATURAL POR AGREGADO RECICLADO AL 30%

1. ESPECIFICACIONES DEL DISEÑO PATRÓN

Las proporciones de los materiales corregidos son los siguientes:

	Diseño	Corregido por humedad			
- Cemento:	341	341	kg/m ³	=	8.0 bls/m ³
- Agua:	222	162	l/m ³		
- Agregado fino:	831	833	kg/m ³		
- Agregado grueso:	876	876	kg/m ³		
- Contenido de aire:	2	%			
- Relación A/C corregida:	0.65				

2. ESPECIFICACIONES DEL DISEÑO PATRÓN

Conocido el contenido de cemento, agua y aire, se determina el volumen absoluto de la pasta y por diferencia con la unidad, el volumen absoluto del agregado total:

- Cemento:	340.77	/	3.12	/	1000	=	0.109	m ³
- Agua:	221.50	/	1.00	/	1000	=	0.222	m ³
- Aire (%):					2.00	=	<u>0.020</u>	m ³
- Volumen absoluto de la pasta:						=	<u>0.351</u>	m ³
- Volumen absoluto del agregado:	1	-	0.351	=			0.649	m ³

3. CÁLCULO DE LOS VOLUMENES ABSOLUTOS DE LOS AGREGADOS

3.1. CÁLCULO DEL MÓDULO DE FINEZA DE LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS CORREGIDO POR VACÍOS

Nota: Los valores de tabla deben incrementarse o disminuirse en 0.1 por cada 5% de disminución o incremento en el porcentaje de vacíos a partir de 35%.

Vacíos del agregado grueso compactado, %	AGN	AGR
	41	44
5% vacíos		0.10
PR del agregado, %	70%	30%
Factor de corrección	0.084	0.054
Factor de corrección total		0.138

De tabla, se tiene que el Mfc para 8.0 bls/m³ es: 5.11

Afectado por el factor de corrección, el Mfca corregido por vacíos es = **4.97**

3.2. CÁLCULO DE LOS PORCENTAJE DE AGREGADO NATURAL Y RECICLADO

Utilizando la siguiente ecuación, se determinan los porcentajes de agregado fino natural y fino reciclado afectados por los PR del agregado correspondientes.

$$r_f = \frac{m_g - m}{m_g - m_f} \times 100$$

Donde:

m: Módulo de fineza de la combinación de agregados corregido por vacíos.

mf: Módulo de fineza del agregado fino.

mg: Módulo de fineza del agregado grueso.

rf: % de agregado fino en relación al volumen absoluto total de agregado.

rg: % de agregado grueso en relación al volumen absoluto total de agregado.

Reemplazando obtenemos:

- r _f natural:	70%	x	48.68%	=	34.08%
- r _g natural:	70%	-	34.08%	=	35.92%
- r _f reciclado:	30%	x	47.70%	=	14.31%
- r _g reciclado:	30%	-	14.31%	=	15.69%

3.3. CÁLCULO DE LOS VOLUMENES ABSOLUTOS DEL AGREGADO

- Agregado fino natural:	0.649	x	34.08%	=	0.221 m ³
- Agregado grueso natural:	0.649	x	35.92%	=	0.233 m ³
- Agregado fino reciclado:	0.649	x	14.31%	=	0.093 m ³
- Agregado grueso reciclado:	0.649	x	15.69%	=	0.102 m ³

4. CÁLCULO DE LOS PESOS SECOS DE LOS AGREGADOS

- Agregado fino natural:	1000	x	0.221	x	2.62	=	580 kg/m ³
- Agregado grueso natural:	1000	x	0.233	x	2.64	=	616 kg/m ³
- Agregado fino reciclado:	1000	x	0.093	x	2.28	=	212 kg/m ³

$$\text{-Agregado grueso reciclado: } 1000 \quad \times \quad 0.102 \quad \times \quad 2.31 \quad = \quad 236 \quad \text{kg/m}^3$$

5. VALORES DE DISEÑO EN ESTADO SECO AL 30% DEL PR

La cantidad de materiales calculadas por el Método de Fineza de la Combinación de Agregados a ser empleados como valores de diseño serán las siguientes:

- Cemento:	341	kg/m ³
- Agua de diseño:	222	l/m ³
- Agregado fino natural seco:	580	kg/m ³
- Agregado fino reciclado seco:	212	kg/m ³
- Agregado grueso natural seco:	616	kg/m ³
- Agregado grueso reciclado seco:	236	kg/m ³

6. CORRECCIÓN DEL DISEÑO POR HUMEDAD DEL AGREGADO

- Peso húmedo del fino natural:	580	x	1.094	=	635	kg/m ³
- Peso húmedo del fino reciclado:	212	x	1.110	=	236	kg/m ³
- Peso húmedo del grueso natural:	616	x	1.010	=	623	kg/m ³
- Peso húmedo del grueso reciclado:	236	x	1.056	=	250	kg/m ³

7. HUMEDAD SUPERFICIAL DEL AGREGADO

- Del agregado fino natural:	9.4	-	1.4	=	8.0	%
- Del agregado fino reciclado:	11.0	-	6.0	=	5.0	%
- Del agregado grueso natural:	1.0	-	0.9	=	0.1	%
- Del agregado grueso reciclado:	5.6	-	5.1	=	0.5	%

8. APORTES DE HUMEDAD DE LOS AGREGADOS

- Agregado fino natural:	580	x	0.08	=	47	l/m ³
- Agregado fino reciclado:	212	x	0.05	=	11	l/m ³
- Agregado grueso natural:	616	x	0.001	=	1	l/m ³
- Agregado grueso reciclado:	236	x	0.005	=	2	l/m ³
- Aporte de humedad del agregado:					<u>61</u>	l/m ³
- Agua efectiva:	222	-	61	=	160.5	l/m ³

9. PESOS DE LOS MATERIALES DE LA UNIDAD CÚBICA DE CONCRETO CORREGIDOS POR HUMEDAD DEL AGREGADO

- Cemento:	341	kg/m ³
- Agua de diseño:	161	l/m ³

- Agregado fino natural seco:	635	kg/m ³
- Agregado fino reciclado seco:	236	kg/m ³
- Agregado grueso natural seco:	623	kg/m ³
- Agregado grueso reciclado seco:	250	kg/m ³

10. PROPORCIÓN EN PESO

- Cemento:	341	/	341	=	1
- Agua efectiva:	161	/	8	=	20.1 l/bls
- Agregado fino natural húmedo:	635	/	341	=	1.9
- Agregado fino reciclado húmedo:	236	/	341	=	0.7
- Agregado grueso natural húmedo:	623	/	341	=	1.8
- Agregado grueso reciclado húmedo:	250	/	341	=	0.7

11. CANTIDAD DE MATERIALES CORREGIDOS POR HUMEDAD POR TANDA DE UNA BOLSA DE CEMENTO

Relación agua/cemento de diseño:	222	/	340.77	=	0.65
Relación agua/cemento de efectiva:	161	/	340.77	=	0.47

Y la cantidad de materiales por tanda de una bolsa serán:

- Cemento:	1	x	42.5	=	42.5 kg/bls
- Agua efectiva:				=	20.1 l/bls
- Agregado fino natural húmedo:	1.9	x	42.5	=	80.8 kg/bls
- Agregado fino reciclado húmedo:	0.7	x	42.5	=	29.8 kg/bls
- Agregado grueso natural húmedo:	1.8	x	42.5	=	76.5 kg/bls
- Agregado grueso reciclado húmedo:	0.7	x	42.5	=	29.8 kg/bls
- Peso por tanda:				=	279.5 kg/bls

12. MATERIALES CORREGIDOS POR HUMEDAD PARA UNA TANDA DE 0.02 M3 (VOLUMEN APROXIMADO DE 3 TESTIGOS DE CONCRETO)

- Cemento:	341	x	0.02	=	6.8 kg/td
- Agua efectiva:	161	x	0.02	=	3.2 l/td
- Agregado fino natural húmedo:	635	x	0.02	=	12.7 kg/td
- Agregado fino reciclado húmedo:	236	x	0.02	=	4.7 kg/td
- Agregado grueso natural húmedo:	623	x	0.02	=	12.5 kg/td
- Agregado grueso reciclado húmedo:	250	x	0.02	=	5.0 kg/td
- Peso por tanda:				=	<u>44.9</u> kg/td

DISEÑO DE MEZCLA DEL CONCRETO REEMPLAZANDO EL AGREGADO NATURAL POR AGREGADO RECICLADO AL 40%

1. ESPECIFICACIONES DEL DISEÑO PATRÓN

Las proporciones de los materiales corregidos son los siguientes:

	Diseño	Corregido por humedad			
- Cemento:	341	341	kg/m ³	=	8.0 bls/m ³
- Agua:	222	162	l/m ³		
- Agregado fino:	831	833	kg/m ³		
- Agregado grueso:	876	876	kg/m ³		
- Contenido de aire:	2	%			
- Relación A/C corregida:	0.65				

2. ESPECIFICACIONES DEL DISEÑO PATRÓN

Conocido el contenido de cemento, agua y aire, se determina el volumen absoluto de la pasta y por diferencia con la unidad, el volumen absoluto del agregado total:

- Cemento:	340.77	/	3.12	/	1000	=	0.109 m ³
- Agua:	221.50	/	1.00	/	1000	=	0.222 m ³
- Aire (%):					2.00	=	<u>0.020</u> m ³
- Volumen absoluto de la pasta:						=	0.351 m ³
- Volumen absoluto del agregado:	1	-	0.351	=			0.649 m ³

3. CÁLCULO DE LOS VOLUMENES ABSOLUTOS DE LOS AGREGADOS

3.1. CÁLCULO DEL MÓDULO DE FINEZA DE LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS CORREGIDO POR VACÍOS

Nota: Los valores de tabla deben incrementarse o disminuirse en 0.1 por cada 5% de disminución o incremento en el porcentaje de vacíos a partir de 35%.

Vacíos del agregado grueso compactado, %	AGN	AGR
	41	44
5% vacíos		0.10
PR del agregado, %	60%	40%
Factor de corrección	0.072	0.072
Factor de corrección total		0.144

De tabla, se tiene que el Mfc para 8.0 bls/m³ es: 5.11

Afectado por el factor de corrección, el Mfca corregido por vacíos es = **4.97**

3.2. CÁLCULO DE LOS PORCENTAJE DE AGREGADO NATURAL Y RECICLADO

Utilizando la siguiente ecuación, se determinan los porcentajes de agregado fino natural y fino reciclado afectados por los PR del agregado correspondientes.

$$r_f = \frac{m_g - m}{m_g - m_f} \times 100$$

Donde:

m: Módulo de fineza de la combinación de agregados corregido por vacíos.

mf: Módulo de fineza del agregado fino.

mg: Módulo de fineza del agregado grueso.

rf: % de agregado fino en relación al volumen absoluto total de agregado.

rg: % de agregado grueso en relación al volumen absoluto total de agregado.

Reemplazando obtenemos:

- r _f natural:	60%	x	48.85%	=	29.31%
- r _g natural:	60%	-	29.31%	=	30.69%
- r _f reciclado:	40%	x	47.86%	=	19.14%
- r _g reciclado:	40%	-	19.14%	=	20.86%

3.3. CÁLCULO DE LOS VOLUMENES ABSOLUTOS DEL AGREGADO

- Agregado fino natural:	0.649	x	29.31%	=	0.190 m ³
- Agregado grueso natural:	0.649	x	30.69%	=	0.199 m ³
- Agregado fino reciclado:	0.649	x	19.14%	=	0.124 m ³
- Agregado grueso reciclado:	0.649	x	20.86%	=	0.135 m ³

4. CÁLCULO DE LOS PESOS SECOS DE LOS AGREGADOS

- Agregado fino natural:	1000	x	0.190	x	2.62	=	499 kg/m ³
- Agregado grueso natural:	1000	x	0.199	x	2.64	=	527 kg/m ³
- Agregado fino reciclado:	1000	x	0.124	x	2.28	=	284 kg/m ³

$$\text{-Agregado grueso reciclado: } 1000 \quad \times \quad 0.135 \quad \times \quad 2.31 \quad = \quad 313 \quad \text{kg/m}^3$$

5. VALORES DE DISEÑO EN ESTADO SECO AL 40% DEL PR

La cantidad de materiales calculadas por el Método de Fineza de la Combinación de Agregados a ser empleados como valores de diseño serán las siguientes:

- Cemento:	341	kg/m ³
- Agua de diseño:	222	l/m ³
- Agregado fino natural seco:	499	kg/m ³
- Agregado fino reciclado seco:	284	kg/m ³
- Agregado grueso natural seco:	527	kg/m ³
- Agregado grueso reciclado seco:	313	kg/m ³

6. CORRECCIÓN DEL DISEÑO POR HUMEDAD DEL AGREGADO

- Peso húmedo del fino natural:	499	x	1.095	=	547	kg/m ³
- Peso húmedo del fino reciclado:	284	x	1.115	=	317	kg/m ³
- Peso húmedo del grueso natural:	527	x	1.012	=	534	kg/m ³
- Peso húmedo del grueso reciclado:	313	x	1.060	=	332	kg/m ³

7. HUMEDAD SUPERFICIAL DEL AGREGADO

- Del agregado fino natural:	9.5	-	1.4	=	8.1	%
- Del agregado fino reciclado:	11.5	-	6.0	=	5.5	%
- Del agregado grueso natural:	1.2	-	0.9	=	0.3	%
- Del agregado grueso reciclado:	6.0	-	5.1	=	0.9	%

8. APORTES DE HUMEDAD DE LOS AGREGADOS

- Agregado fino natural:	499	x	0.081	=	41	l/m ³
- Agregado fino reciclado:	284	x	0.055	=	16	l/m ³
- Agregado grueso natural:	527	x	0.003	=	2	l/m ³
- Agregado grueso reciclado:	313	x	0.009	=	3	l/m ³
- Aporte de humedad del agregado:					<u>62</u>	l/m ³
- Agua efectiva:	222	-	62	=	159.5	l/m ³

9. PESOS DE LOS MATERIALES DE LA UNIDAD CÚBICA DE CONCRETO CORREGIDOS POR HUMEDAD DEL AGREGADO

- Cemento:	341	kg/m ³
- Agua de diseño:	160	l/m ³

- Agregado fino natural seco:	547	kg/m ³
- Agregado fino reciclado seco:	317	kg/m ³
- Agregado grueso natural seco:	534	kg/m ³
- Agregado grueso reciclado seco:	332	kg/m ³

10. PROPORCIÓN EN PESO

- Cemento:	341	/	341	=	1
- Agua efectiva:	160	/	8	=	19.9 l/bls
- Agregado fino natural húmedo:	547	/	341	=	1.6
- Agregado fino reciclado húmedo:	317	/	341	=	0.9
- Agregado grueso natural húmedo:	534	/	341	=	1.6
- Agregado grueso reciclado húmedo:	332	/	341	=	1

11. CANTIDAD DE MATERIALES CORREGIDOS POR HUMEDAD POR TANDA DE UNA BOLSA DE CEMENTO

Relación agua/cemento de diseño:	222	/	340.77	=	0.65
Relación agua/cemento de efectiva:	160	/	340.77	=	0.47

Y la cantidad de materiales por tanda de una bolsa serán:

- Cemento:	1	x	42.5	=	42.5 kg/bls
- Agua efectiva:				=	19.9 l/bls
- Agregado fino natural húmedo:	1.6	x	42.5	=	68.0 kg/bls
- Agregado fino reciclado húmedo:	0.9	x	42.5	=	38.3 kg/bls
- Agregado grueso natural húmedo:	1.6	x	42.5	=	68.0 kg/bls
- Agregado grueso reciclado húmedo:	1	x	42.5	=	42.5 kg/bls
- Peso por tanda:				=	279.2 kg/bls

12. MATERIALES CORREGIDOS POR HUMEDAD PARA UNA TANDA DE 0.02 M3 (VOLUMEN APROXIMADO DE 3 TESTIGOS DE CONCRETO)

- Cemento:	341	x	0.02	=	6.8 kg/td
- Agua efectiva:	160	x	0.02	=	3.2 l/td
- Agregado fino natural húmedo:	547	x	0.02	=	10.9 kg/td
- Agregado fino reciclado húmedo:	317	x	0.02	=	6.3 kg/td
- Agregado grueso natural húmedo:	534	x	0.02	=	10.7 kg/td
- Agregado grueso reciclado húmedo:	332	x	0.02	=	6.6 kg/td
- Peso por tanda:				=	<u>44.5</u> kg/td

DISEÑO DE MEZCLA DEL CONCRETO REEMPLAZANDO EL AGREGADO NATURAL POR AGREGADO RECICLADO AL 50%

1. ESPECIFICACIONES DEL DISEÑO PATRÓN

Las proporciones de los materiales corregidos son los siguientes:

	Diseño	Corregido por humedad			
- Cemento:	341	341	kg/m ³	=	8.0 bls/m ³
- Agua:	222	162	l/m ³		
- Agregado fino:	831	833	kg/m ³		
- Agregado grueso:	876	876	kg/m ³		
- Contenido de aire:	2	%			
- Relación A/C corregida:	0.65				

2. ESPECIFICACIONES DEL DISEÑO PATRÓN

Conocido el contenido de cemento, agua y aire, se determina el volumen absoluto de la pasta y por diferencia con la unidad, el volumen absoluto del agregado total:

- Cemento:	340.77	/	3.12	/	1000	=	0.109 m ³
- Agua:	221.50	/	1.00	/	1000	=	0.222 m ³
- Aire (%):					2.00	=	<u>0.020</u> m ³
- Volumen absoluto de la pasta:						=	0.351 m ³
- Volumen absoluto del agregado:	1	-	0.351	=			0.649 m ³

3. CÁLCULO DE LOS VOLUMENES ABSOLUTOS DE LOS AGREGADOS

3.1. CÁLCULO DEL MÓDULO DE FINEZA DE LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS CORREGIDO POR VACÍOS

Nota: Los valores de tabla deben incrementarse o disminuirse en 0.1 por cada 5% de disminución o incremento en el porcentaje de vacíos a partir de 35%.

Vacíos del agregado grueso compactado, %	AGN	AGR
5% vacíos	41	44
PR del agregado, %	50%	50%
Factor de corrección	0.06	0.09
Factor de corrección total	0.15	

De tabla, se tiene que el Mfc para 8.0 bls/m³ es: 5.11

Afectado por el factor de corrección, el Mfca corregido por vacíos es = **4.96**

3.2. CÁLCULO DE LOS PORCENTAJE DE AGREGADO NATURAL Y RECICLADO

Utilizando la siguiente ecuación, se determinan los porcentajes de agregado fino natural y fino reciclado afectados por los PR del agregado correspondientes.

$$r_f = \frac{m_g - m}{m_g - m_f} \times 100$$

Donde:

m: Módulo de fineza de la combinación de agregados corregido por vacíos.

mf: Módulo de fineza del agregado fino.

mg: Módulo de fineza del agregado grueso.

rf: % de agregado fino en relación al volumen absoluto total de agregado.

rg: % de agregado grueso en relación al volumen absoluto total de agregado.

Reemplazando obtenemos:

- r _f natural:	50%	x	49.01%	=	25%
- r _g natural:	50%	-	24.51%	=	25%
- r _f reciclado:	50%	x	48.02%	=	24%
- r _g reciclado:	50%	-	24.01%	=	26%

3.3. CÁLCULO DE LOS VOLUMENES ABSOLUTOS DEL AGREGADO

- Agregado fino natural:	0.649	x	24.51%	=	0.159 m ³
- Agregado grueso natural:	0.649	x	25.50%	=	0.166 m ³
- Agregado fino reciclado:	0.649	x	24.01%	=	0.156 m ³
- Agregado grueso reciclado:	0.649	x	25.99%	=	0.169 m ³

4. CÁLCULO DE LOS PESOS SECOS DE LOS AGREGADOS

- Agregado fino natural:	1000	x	0.159	x	2.62	=	417 kg/m ³
- Agregado grueso natural:	1000	x	0.166	x	2.64	=	438 kg/m ³
- Agregado fino reciclado:	1000	x	0.156	x	2.28	=	356 kg/m ³

$$\text{-Agregado grueso reciclado: } 1000 \quad \times \quad 0.169 \quad \times \quad 2.31 \quad = \quad 390 \quad \text{kg/m}^3$$

5. VALORES DE DISEÑO EN ESTADO SECO AL 20% DEL PR

La cantidad de materiales calculadas por el Método de Fineza de la Combinación de Agregados a ser empleados como valores de diseño serán las siguientes:

- Cemento:	341	kg/m ³
- Agua de diseño:	222	l/m ³
- Agregado fino natural seco:	417	kg/m ³
- Agregado fino reciclado seco:	356	kg/m ³
- Agregado grueso natural seco:	438	kg/m ³
- Agregado grueso reciclado seco:	390	kg/m ³

6. CORRECCIÓN DEL DISEÑO POR HUMEDAD DEL AGREGADO

- Peso húmedo del fino natural:	417	x	1.095	=	457	kg/m ³
- Peso húmedo del fino reciclado:	356	x	1.112	=	396	kg/m ³
- Peso húmedo del grueso natural:	438	x	1.010	=	443	kg/m ³
- Peso húmedo del grueso reciclado:	390	x	1.058	=	413	kg/m ³

7. HUMEDAD SUPERFICIAL DEL AGREGADO

- Del agregado fino natural:	9.5	-	1.4	=	8.1	%
- Del agregado fino reciclado:	11.2	-	6.0	=	5.2	%
- Del agregado grueso natural:	1.0	-	0.9	=	0.1	%
- Del agregado grueso reciclado:	5.8	-	5.1	=	0.7	%

8. APORTES DE HUMEDAD DE LOS AGREGADOS

- Agregado fino natural:	417	x	0.081	=	34	l/m ³
- Agregado fino reciclado:	356	x	0.052	=	19	l/m ³
- Agregado grueso natural:	438	x	0.001	=	1	l/m ³
- Agregado grueso reciclado:	390	x	0.007	=	3	l/m ³
- Aporte de humedad del agregado:					<u>57</u>	l/m ³
- Agua efectiva:	222	-	57	=	164.5	l/m ³

9. PESOS DE LOS MATERIALES DE LA UNIDAD CÚBICA DE CONCRETO CORREGIDOS POR HUMEDAD DEL AGREGADO

- Cemento:	341	kg/m ³
- Agua de diseño:	165	l/m ³

- Agregado fino natural seco:	457	kg/m ³
- Agregado fino reciclado seco:	396	kg/m ³
- Agregado grueso natural seco:	443	kg/m ³
- Agregado grueso reciclado seco:	413	kg/m ³

10. PROPORCIÓN EN PESO

- Cemento:	341	/	341	=	1
- Agua efectiva:	165	/	8	=	20.6 l/bls
- Agregado fino natural húmedo:	457	/	341	=	1.3
- Agregado fino reciclado húmedo:	396	/	341	=	1.2
- Agregado grueso natural húmedo:	443	/	341	=	1.3
- Agregado grueso reciclado húmedo:	413	/	341	=	1.2

11. CANTIDAD DE MATERIALES CORREGIDOS POR HUMEDAD POR TANDA DE UNA BOLSA DE CEMENTO

Relación agua/cemento de diseño:	222	/	340.77	=	0.65
Relación agua/cemento de efectiva:	165	/	340.77	=	0.48

Y la cantidad de materiales por tanda de una bolsa serán:

- Cemento:	1	x	42.5	=	42.5 kg/bls
- Agua efectiva:				=	20.6 l/bls
- Agregado fino natural húmedo:	1.3	x	42.5	=	55.3 kg/bls
- Agregado fino reciclado húmedo:	1.2	x	42.5	=	51.0 kg/bls
- Agregado grueso natural húmedo:	1.3	x	42.5	=	55.3 kg/bls
- Agregado grueso reciclado húmedo:	1.2	x	42.5	=	51.0 kg/bls
- Peso por tanda:				=	<u>275.7</u> kg/bls

12. MATERIALES CORREGIDOS POR HUMEDAD PARA UNA TANDA DE 0.02 M3 (VOLUMEN APROXIMADO DE 3 TESTIGOS DE CONCRETO)

- Cemento:	341	x	0.02	=	6.8 kg/td
- Agua efectiva:	165	x	0.02	=	3.3 l/td
- Agregado fino natural húmedo:	457	x	0.02	=	9.1 kg/td
- Agregado fino reciclado húmedo:	396	x	0.02	=	7.9 kg/td
- Agregado grueso natural húmedo:	443	x	0.02	=	8.9 kg/td
- Agregado grueso reciclado húmedo:	413	x	0.02	=	8.3 kg/td
- Peso por tanda:				=	<u>44.3</u> kg/td

DISEÑO DE MEZCLA DEL CONCRETO REEMPLAZANDO EL AGREGADO NATURAL POR AGREGADO RECICLADO AL 100%

1. ESPECIFICACIONES DEL DISEÑO PATRÓN

Las proporciones de los materiales corregidos son las siguientes:

	Diseño	Corregido por humedad			
- Cemento:	341	341	kg/m ³	=	8.0 bls/m ³
- Agua:	222	162	l/m ³		
- Agregado fino:	831	833	kg/m ³		
- Agregado grueso:	876	876	kg/m ³		
- Contenido de aire:	2	%			
- Relación A/C corregida:	0.65				

2. ESPECIFICACIONES DEL DISEÑO PATRÓN

Conocido el contenido de cemento, agua y aire, se determina el volumen absoluto de la pasta y por diferencia con la unidad, el volumen absoluto del agregado total:

- Cemento:	340.77	/	3.12	/	1000	=	0.109 m ³
- Agua:	221.50	/	1.00	/	1000	=	0.222 m ³
- Aire (%):					2.00	=	<u>0.020</u> m ³
- Volumen absoluto de la pasta:						=	0.351 m ³
- Volumen absoluto del agregado:	1	-	0.351	=			0.649 m ³

3. CÁLCULO DE LOS VOLUMENES ABSOLUTOS DE LOS AGREGADOS

3.1. CÁLCULO DEL MÓDULO DE FINEZA DE LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS CORREGIDO POR VACÍOS

Nota: Los valores de tabla deben incrementarse o disminuirse en 0.1 por cada 5% de disminución o incremento en el porcentaje de vacíos a partir de 35%.

Vacíos del agregado grueso compactado, %	AGN	AGR
5% vacíos	41	44
PR del agregado, %	0%	100%
Factor de corrección	0	0.18
Factor de corrección total		0.18

De tabla, se tiene que el Mfc para 8.0 bls/m³ es: 5.11

Afectado por el factor de corrección, el Mfca corregido por vacíos es = **4.93**

3.2. CÁLCULO DE LOS PORCENTAJE DE AGREGADO NATURAL Y RECICLADO

Utilizando la siguiente ecuación, se determinan los porcentajes de agregado fino natural y fino reciclado afectados por los PR del agregado correspondientes.

$$r_f = \frac{m_g - m}{m_g - m_f} \times 100$$

Donde:

m: Módulo de fineza de la combinación de agregados corregido por vacíos.

mf: Módulo de fineza del agregado fino.

mg: Módulo de fineza del agregado grueso.

rf: % de agregado fino en relación al volumen absoluto total de agregado.

rg: % de agregado grueso en relación al volumen absoluto total de agregado.

Reemplazando obtenemos:

- r _f natural:	0%	x	49.86%	=	0.00%
- r _g natural:	0%	-	0.00%	=	0.00%
- r _f reciclado:	100%	x	48.81%	=	48.81%
- r _g reciclado:	100%	-	48.81%	=	51.19%

3.3. CÁLCULO DE LOS VOLUMENES ABSOLUTOS DEL AGREGADO

- Agregado fino natural:	0.649	x	0.00%	=	0.000 m ³
- Agregado grueso natural:	0.649	x	0.00%	=	0.000 m ³
- Agregado fino reciclado:	0.649	x	48.81%	=	0.317 m ³
- Agregado grueso reciclado:	0.649	x	51.19%	=	0.332 m ³

4. CÁLCULO DE LOS PESOS SECOS DE LOS AGREGADOS

- Agregado fino natural:	1000	x	0.000	x	2.62	=	0 kg/m ³
- Agregado grueso natural:	1000	x	0.000	x	2.64	=	0 kg/m ³
- Agregado fino reciclado:	1000	x	0.317	x	2.28	=	723 kg/m ³

$$\text{-Agregado grueso reciclado: } 1000 \quad \times \quad 0.332 \quad \times \quad 2.31 \quad = \quad 768 \quad \text{kg/m}^3$$

5. VALORES DE DISEÑO EN ESTADO SECO AL 20% DEL PR

La cantidad de materiales calculadas por el Método de Fineza de la Combinación de Agregados a ser empleados como valores de diseño serán las siguientes:

- Cemento:	341	kg/m ³
- Agua de diseño:	222	l/m ³
- Agregado fino natural seco:	0	kg/m ³
- Agregado fino reciclado seco:	723	kg/m ³
- Agregado grueso natural seco:	0	kg/m ³
- Agregado grueso reciclado seco:	768	kg/m ³

6. CORRECCIÓN DEL DISEÑO POR HUMEDAD DEL AGREGADO

- Peso húmedo del fino natural:	0	x	1.095	=	0	kg/m ³
- Peso húmedo del fino reciclado:	723	x	1.115	=	807	kg/m ³
- Peso húmedo del grueso natural:	0	x	1.012	=	0	kg/m ³
- Peso húmedo del grueso reciclado:	768	x	1.060	=	815	kg/m ³

7. HUMEDAD SUPERFICIAL DEL AGREGADO

- Del agregado fino natural:	9.5	-	1.4	=	8.1	%
- Del agregado fino reciclado:	11.5	-	6.0	=	5.5	%
- Del agregado grueso natural:	1.2	-	0.9	=	0.3	%
- Del agregado grueso reciclado:	6.0	-	5.1	=	0.9	%

8. APORTES DE HUMEDAD DE LOS AGREGADOS

- Agregado fino natural:	0	x	0.081	=	0	l/m ³
- Agregado fino reciclado:	723	x	0.055	=	40	l/m ³
- Agregado grueso natural:	0	x	0.003	=	0	l/m ³
- Agregado grueso reciclado:	768	x	0.009	=	7	l/m ³
- Aporte de humedad del agregado:					<u>47</u>	l/m ³
- Agua efectiva:	222	-	47	=	174.5	l/m ³

9. PESOS DE LOS MATERIALES DE LA UNIDAD CÚBICA DE CONCRETO CORREGIDOS POR HUMEDAD DEL AGREGADO

- Cemento:	341	kg/m ³
- Agua de diseño:	175	l/m ³

- Agregado fino natural seco:	0	kg/m ³
- Agregado fino reciclado seco:	807	kg/m ³
- Agregado grueso natural seco:	0	kg/m ³
- Agregado grueso reciclado seco:	815	kg/m ³

10. PROPORCIÓN EN PESO

- Cemento:	341	/	341	=	1
- Agua efectiva:	175	/	8	=	21.8 l/bls
- Agregado fino natural húmedo:	0	/	341	=	0
- Agregado fino reciclado húmedo:	807	/	341	=	2.4
- Agregado grueso natural húmedo:	0	/	341	=	0
- Agregado grueso reciclado húmedo:	815	/	341	=	2.4

11. CANTIDAD DE MATERIALES CORREGIDOS POR HUMEDAD POR TANDA DE UNA BOLSA DE CEMENTO

Relación agua/cemento de diseño:	222	/	340.77	=	0.65
Relación agua/cemento de efectiva:	175	/	340.77	=	0.51

Y la cantidad de materiales por tanda de una bolsa serán:

- Cemento:	1	x	42.5	=	42.5 kg/bls
- Agua efectiva:				=	21.8 l/bls
- Agregado fino natural húmedo:	0	x	42.5	=	0.0 kg/bls
- Agregado fino reciclado húmedo:	2.4	x	42.5	=	102.0 kg/bls
- Agregado grueso natural húmedo:	0	x	42.5	=	0.0 kg/bls
- Agregado grueso reciclado húmedo:	2.4	x	42.5	=	102.0 kg/bls
- Peso por tanda:				=	<u>268.3</u> kg/bls

12. MATERIALES CORREGIDOS POR HUMEDAD PARA UNA TANDA DE 0.02 M3 (VOLUMEN APROXIMADO DE 3 TESTIGOS DE CONCRETO)

- Cemento:	341	x	0.02	=	6.8 kg/td
- Agua efectiva:	175	x	0.02	=	3.5 l/td
- Agregado fino natural húmedo:	0	x	0.02	=	0.0 kg/td
- Agregado fino reciclado húmedo:	807	x	0.02	=	16.1 kg/td
- Agregado grueso natural húmedo:	0	x	0.02	=	0.0 kg/td
- Agregado grueso reciclado húmedo:	815	x	0.02	=	16.3 kg/td
- Peso por tanda:				=	<u>42.7</u> kg/td

**ANEXO D – PROGRAMACIÓN DE ELABORACIÓN Y ROTURA DEL
CONCRETO**

Ítem	ID	Descripción	PR, %	Tanda	Curado, d	Elaboración	Rotura
1	MP1	Concreto de prueba (cilindros)	0	1	7	14/09/2017	21/09/2017
2	MP2		0	1	7	14/09/2017	21/09/2017
3	MP3		0	1	7	14/09/2017	21/09/2017
4	M1	Concreto de control (cilindros)	0	2	7	9/10/2017	16/10/2017
5	M2		0	2	7	9/10/2017	16/10/2017
6	M3		0	2	7	9/10/2017	16/10/2017
7	M4		0	3	28	4/10/2017	1/11/2017
8	M5		0	3	28	4/10/2017	1/11/2017
9	M6		0	3	14	4/10/2017	18/10/2017
10	M7		0	3	14	4/10/2017	18/10/2017
11	M8		0	3	14	4/10/2017	18/10/2017
12	M9		0	3	7	4/10/2017	11/10/2017
13	M10		0	4	28	4/10/2017	1/11/2017
14	M11		0	4	28	4/10/2017	1/11/2017
15	M12		0	4	14	4/10/2017	18/10/2017
16	M13		0	4	14	4/10/2017	18/10/2017
17	M14		0	4	7	4/10/2017	11/10/2017
18	M15		0	4	7	4/10/2017	11/10/2017
19	M16	Concreto con un PR de 50% (cilindros)	50	5	28	5/10/2017	2/11/2017
20	M17		50	5	28	5/10/2017	2/11/2017
21	M18		50	5	14	5/10/2017	19/10/2017
22	M19		50	5	14	5/10/2017	19/10/2017
23	M20		50	5	7	5/10/2017	12/10/2017
24	M21		50	5	7	5/10/2017	12/10/2017
25	M22		50	6	28	5/10/2017	2/11/2017
26	M23		50	6	28	5/10/2017	2/11/2017
27	M24		50	6	14	5/10/2017	19/10/2017
28	M25		50	6	14	5/10/2017	19/10/2017
29	M26	50	6	7	5/10/2017	12/10/2017	
30	M27	50	6	7	5/10/2017	12/10/2017	
31	M28	Concreto con un PR de 40% (cilindros)	40	7	28	6/10/2017	3/11/2017
32	M29		40	7	28	6/10/2017	3/11/2017
33	M30		40	7	14	6/10/2017	20/10/2017
34	M31		40	7	14	6/10/2017	20/10/2017
35	M32		40	7	7	6/10/2017	13/10/2017

Ítem	ID	Descripción	PR, %	Tanda	Curado, d	Elaboración	Rotura
36	M33		40	7	7	6/10/2017	13/10/2017
37	M34		40	7	28	6/10/2017	3/11/2017
38	M35		40	7	7	6/10/2017	13/10/2017
39	M36	Concreto con un PR de 40% (cilindros)	40	8	28	6/10/2017	3/11/2017
40	M37		40	8	28	6/10/2017	3/11/2017
41	M38		40	8	14	6/10/2017	20/10/2017
42	M39		40	8	14	6/10/2017	20/10/2017
43	M40		40	8	7	6/10/2017	13/10/2017
44	M41		40	8	7	6/10/2017	13/10/2017
45	M42		30	9	28	6/10/2017	3/11/2017
46	M43		30	9	28	6/10/2017	3/11/2017
47	M44		30	9	14	6/10/2017	20/10/2017
48	M45		30	9	7	6/10/2017	13/10/2017
49	M46	Concreto con un PR de 30% (cilindros)	30	10	28	7/10/2017	4/11/2017
50	M47		30	10	28	7/10/2017	4/11/2017
51	M48		30	10	14	7/10/2017	21/10/2017
52	M49		30	10	14	7/10/2017	21/10/2017
53	M50		30	10	7	7/10/2017	14/10/2017
54	M51		30	10	7	7/10/2017	14/10/2017
55	M52		30	10	14	7/10/2017	21/10/2017
56	M53		30	10	7	7/10/2017	14/10/2017
57	M54		20	11	28	7/10/2017	4/11/2017
58	M55		20	11	28	7/10/2017	4/11/2017
59	M56		20	11	14	7/10/2017	21/10/2017
60	M57		20	11	14	7/10/2017	21/10/2017
61	M58	Concreto con un PR de 20% (cilindros)	20	11	7	7/10/2017	14/10/2017
62	M59		20	11	7	7/10/2017	14/10/2017
63	M60		20	11	28	7/10/2017	4/11/2017
64	M61		20	11	14	7/10/2017	21/10/2017
65	M62		20	12	28	7/10/2017	4/11/2017
66	M63		20	12	14	7/10/2017	21/10/2017
67	M64		20	12	7	7/10/2017	14/10/2017
68	M65		20	12	7	7/10/2017	14/10/2017
69	M66		50	13	28	8/10/2017	5/11/2017
70	M67	Concreto con un PR de 50% (cilindros)	50	13	28	8/10/2017	5/11/2017
71	M68		50	13	14	8/10/2017	22/10/2017
72	M69		50	13	14	8/10/2017	22/10/2017
73	M70		50	13	7	8/10/2017	15/10/2017

Ítem	ID	Descripción	PR, %	Tanda	Curado, d	Elaboración	Rotura
74	M71		50	13	7	8/10/2017	15/10/2017
75	M72		30	14	28	8/10/2017	5/11/2017
76	M73	Concreto con un PR de 30% (cilindros)	30	14	28	8/10/2017	5/11/2017
77	M74		30	14	14	8/10/2017	22/10/2017
78	M75		30	14	14	8/10/2017	22/10/2017
79	M76		30	14	7	8/10/2017	15/10/2017
80	M77		30	14	7	8/10/2017	15/10/2017
81	M78		20	15	28	8/10/2017	5/11/2017
82	M79	Concreto con un PR de 20% (cilindros)	20	15	28	8/10/2017	5/11/2017
83	M80		20	15	14	8/10/2017	22/10/2017
84	M81		20	15	14	8/10/2017	22/10/2017
85	M82		20	15	7	8/10/2017	15/10/2017
86	M83		20	15	7	8/10/2017	15/10/2017
87	M84	Concreto de control (cilindros)	0	16	28	8/10/2017	5/11/2017
88	M85		0	16	28	8/10/2017	5/11/2017
89	M86		0	16	14	8/10/2017	22/10/2017
90	M87	Concreto con un PR de 40% (cilindros)	40	17	28	9/10/2017	6/11/2017
91	M88		40	17	14	9/10/2017	23/10/2017
92	M89		40	17	14	9/10/2017	23/10/2017
93	M90		40	17	7	9/10/2017	16/10/2017
94	M91			100	18	28	9/10/2017
95	M92	Concreto con un PR de 100% (cilindros)	100	18	28	9/10/2017	6/11/2017
96	M93		100	18	28	9/10/2017	6/11/2017
97	M94		100	18	28	9/10/2017	6/11/2017
98	M95		100	18	28	9/10/2017	6/11/2017
99	M96		100	18	28	9/10/2017	6/11/2017
100	M97		P0	19	28	9/10/2017	6/11/2017
101	M98	Concreto de control (prismas)	P0	19	28	9/10/2017	6/11/2017
102	M99		P0	19	28	9/10/2017	6/11/2017
103	M100		P0	20	28	9/10/2017	6/11/2017
104	M101		P0	20	28	9/10/2017	6/11/2017
105	M102		P0	20	28	9/10/2017	6/11/2017
106	M103	Concreto con mejor resistencia a compresión, PR - 20% (prismas)	P1	21	28	4/11/2017	2/12/2017
107	M104		P1	21	28	4/11/2017	2/12/2017
108	M105		P1	21	28	4/11/2017	2/12/2017
109	M106		P1	22	28	4/11/2017	2/12/2017
110	M107		P1	22	28	4/11/2017	2/12/2017
111	M108		P1	22	28	4/11/2017	2/12/2017

ANEXO E – CÁLCULO DE DENSIDADES DEL CONCRETO FRESCO

	PR, %					
	0	20	30	40	50	100
Masa molde, kg	3.475	3.475	3.475	3.475	3.475	3.475
Masa molde + C ^o F ^o , kg	20.125	19.87	19.77	19.725	19.65	19.105
Volumen recipiente, m ³	0.0071	0.0071	0.0071	0.0071	0.0071	0.0071
Densidad, kg/m ³	2345	2309	2295	2289	2278	2201

ANEXO F – RESISTENCIA A COMPRESIÓN INDIVIDUAL DE ESPECIMENES CILÍNDRICOS

ID	PR, %	Edad, d	Masa, kg	Diámetro, cm				Longitud, mm				Área, cm ²	P, kg	Xi, kg/cm ²
				D1	D2	D3	Dprom	L1	L2	L3	Lprom			
MP1	0	7	12.80	15.12	15.14	15.06	15.11	305	304	305	305	179.32	48500	270
MP2	0	7	12.95	15.17	15.18	15.15	15.17	303	303	304	303	180.74	48000	266
MP3	0	7	12.90	15.25	15.15	15.18	15.19	303	304	302	303	181.22	49500	273
M1	0	7	13.30	15.43	15.30	15.43	15.39	304	304	304	304	186.02	42500	228
M2	0	7	12.91	15.19	15.16	15.35	15.23	304	303	302	303	182.18	40000	220
M3	0	7	12.94	15.13	15.28	15.20	15.20	302	304	303	303	181.46	40500	223
M4	0	28	12.82	15.25	15.16	15.05	15.15	303	303	302	303	180.27	64500	358
M5	0	28	12.85	15.11	15.15	15.22	15.16	304	304	304	304	180.50	61000	338
M6	0	14	12.87	15.15	15.21	15.05	15.14	301	302	302	302	180.03	53000	294
M7	0	14	12.95	15.35	15.22	15.16	15.24	303	301	302	302	182.41	52000	285
M8	0	14	12.89	15.05	15.28	15.14	15.16	303	304	303	303	180.50	54000	299
M9	0	7	13.00	15.25	15.32	15.39	15.32	301	300	301	301	184.33	45000	244
M10	0	28	12.87	15.13	15.27	15.25	15.22	300	300	300	300	181.94	61500	338
M11	0	28	12.89	15.29	15.25	15.15	15.23	303	302	302	302	182.18	62000	340
M12	0	14	13.04	15.23	15.26	15.30	15.26	304	305	304	304	182.89	55000	301
M13	0	14	12.92	15.22	15.16	15.33	15.24	302	301	302	302	182.41	44500	244
M14	0	7	12.95	15.20	15.15	15.28	15.21	301	303	302	302	181.70	43000	237
M15	0	7	12.92	15.17	15.06	15.02	15.08	303	301	302	302	178.60	41000	230
M16	50	28	12.65	15.22	15.32	15.29	15.28	303	304	303	303	183.37	52500	286
M17	50	28	12.68	15.19	15.28	15.29	15.25	304	304	305	304	182.65	51500	282

ID	PR, %	Edad, d	Masa, kg	Diámetro, cm				Longitud, mm				Área, cm ²	P, kg	Xi, kg/cm ²
				D1	D2	D3	Dprom	L1	L2	L3	Lprom			
M18	50	14	12.41	15.12	15.17	15.19	15.16	302	303	303	303	180.50	47500	263
M19	50	14	12.67	15.30	15.17	15.18	15.22	304	304	303	304	181.94	46500	256
M20	50	7	12.50	15.13	15.32	15.12	15.19	303	303	304	303	181.22	37500	207
M21	50	7	12.48	15.21	15.12	15.27	15.20	302	302	301	302	181.46	39500	218
M22	50	28	12.72	15.32	15.30	15.25	15.29	305	305	304	305	183.61	53000	289
M23	50	28	12.60	15.19	15.25	15.29	15.24	303	304	302	303	182.41	53500	293
M24	50	14	12.40	15.08	15.20	15.12	15.13	301	303	302	302	179.79	48500	270
M25	50	14	12.64	15.256	15.332	15.289	15.29	303	303	303	303	183.61	48500	264
M26	50	7	12.58	15.151	15.256	15.113	15.17	303	304	304	304	180.74	35000	194
M27	50	7	12.67	15.226	15.361	15.133	15.24	303	304	304	304	182.41	37500	206
M28	40	28	12.62	15.23	15.16	15.32	15.23	303	303	303	303	182.18	55500	305
M29	40	28	12.80	15.26	15.33	15.24	15.28	306	305	304	305	183.37	54500	297
M30	40	14	12.71	15.22	15.17	15.20	15.19	304	304	305	304	181.22	51000	281
M31	40	14	12.62	15.24	15.28	15.12	15.21	303	303	304	303	181.70	50500	278
M32	40	7	12.61	15.06	15.17	15.34	15.19	303	303	304	303	181.22	38500	212
M33	40	7	12.68	15.17	15.20	15.20	15.19	303	304	305	304	181.22	38000	210
M34	40	28	12.60	15.18	15.28	15.12	15.20	304	304	304	304	181.46	53000	292
M35	40	7	12.63	15.23	15.37	15.29	15.29	302	303	302	302	183.61	40000	218
M36	40	28	12.69	15.11	15.23	15.15	15.16	305	305	305	305	180.50	49500	274
M37	40	28	12.50	15.26	14.96	15.08	15.10	305	304	304	304	179.08	51500	288
M38	40	14	12.67	15.27	15.28	15.20	15.25	304	304	305	304	182.65	48000	263
M39	40	14	12.67	15.25	15.07	15.40	15.24	303	303	305	304	182.41	46000	252

ID	PR, %	Edad, d	Masa, kg	Diámetro, cm				Longitud, mm				Área, cm ²	P, kg	Xi, kg/cm ²
				D1	D2	D3	Dprom	L1	L2	L3	Lprom			
M40	40	7	12.68	15.13	15.40	15.27	15.27	303	304	303	303	183.13	37500	205
M41	40	7	13.01	15.33	15.46	15.46	15.42	303	304	304	304	186.75	36000	193
M42	30	28	12.60	15.10	15.19	15.20	15.16	304	304	303	304	180.50	55500	307
M43	30	28	12.59	15.21	15.46	15.10	15.26	303	303	304	303	182.89	50500	276
M44	30	14	12.60	15.24	15.42	15.12	15.26	304	304	304	304	182.89	46000	252
M45	30	7	12.68	15.16	15.27	15.22	15.22	304	304	303	304	181.94	36500	201
M46	30	28	12.74	15.17	15.29	15.17	15.21	305	305	305	305	181.70	55500	305
M47	30	28	12.62	15.00	15.16	15.04	15.07	305	304	305	305	178.37	54500	306
M48	30	14	12.76	15.24	15.30	15.17	15.24	305	305	305	305	182.41	48500	266
M49	30	14	12.72	15.19	15.34	15.11	15.21	303	304	303	303	181.70	47500	261
M50	30	7	12.66	15.14	15.09	15.31	15.18	304	304	304	304	180.98	38000	210
M51	30	7	12.72	15.38	15.28	15.26	15.31	303	303	302	303	184.09	39500	215
M52	30	14	12.70	15.26	15.05	15.27	15.19	303	304	303	303	181.22	50000	276
M53	30	7	12.76	15.27	15.12	15.41	15.27	305	304	304	304	183.13	37500	205
M54	20	28	13.12	15.30	15.47	15.43	15.40	305	305	304	305	186.27	61000	327
M55	20	28	12.94	15.40	15.28	15.17	15.28	305	305	304	305	183.37	58000	316
M56	20	14	12.89	15.15	15.33	15.24	15.24	305	305	304	305	182.41	49000	269
M57	20	14	12.60	15.08	15.13	15.25	15.15	304	303	303	303	180.27	48500	269
M58	20	7	12.73	15.27	15.11	15.29	15.22	303	303	302	303	181.94	40000	220
M59	20	7	12.76	15.21	15.07	15.38	15.22	303	303	303	303	181.94	39500	217
M60	20	28	12.60	15.06	15.39	14.97	15.14	304	304	304	304	180.03	53500	297
M61	20	14	12.81	15.21	15.16	15.39	15.25	304	303	304	304	182.65	50000	274

ID	PR, %	Edad, d	Masa, kg	Diámetro, cm				Longitud, mm				Área, cm ²	P, kg	Xi, kg/cm ²
				D1	D2	D3	Dprom	L1	L2	L3	Lprom			
M62	20	28	12.62	15.09	15.11	15.20	15.13	304	303	303	303	179.79	54500	303
M63	20	14	12.71	15.22	15.10	15.16	15.16	303	303	303	303	180.50	49000	271
M64	20	7	12.79	15.29	15.14	15.26	15.23	304	303	303	303	182.18	37500	206
M65	20	7	12.81	15.19	15.23	15.26	15.23	304	303	303	303	182.18	29000	159
M66	50	28	12.59	15.32	15.28	15.29	15.30	302	302	303	302	183.85	54500	296
M67	50	28	12.61	15.22	15.20	15.19	15.20	304	303	303	303	181.46	54500	300
M68	50	14	12.40	15.04	15.13	14.97	15.04	305	304	304	304	177.66	47500	267
M69	50	14	12.61	15.31	15.13	15.29	15.24	304	304	304	304	182.41	48000	263
M70	50	7	12.58	15.17	15.22	15.40	15.26	305	304	304	304	182.89	36500	200
M71	50	7	12.56	15.14	15.18	15.39	15.24	303	304	303	303	182.41	35500	195
M72	30	28	12.64	15.17	15.06	15.26	15.16	304	304	302	303	180.50	57500	319
M73	30	28	12.60	15.13	15.18	15.28	15.20	304	303	303	303	181.46	58000	320
M74	30	14	12.71	15.16	15.11	15.37	15.21	304	304	304	304	181.70	49500	272
M75	30	14	12.74	15.19	15.32	15.17	15.23	304	303	304	304	182.18	49000	269
M76	30	7	12.76	15.17	15.39	15.19	15.25	303	303	303	303	182.65	39000	214
M77	30	7	12.70	15.27	15.07	15.30	15.22	305	306	305	305	181.94	40000	220
M78	20	28	12.65	15.07	15.00	15.16	15.08	305	305	305	305	178.60	58000	325
M79	20	28	12.85	15.13	15.41	15.19	15.25	305	305	306	305	182.65	56500	309
M80	20	14	12.96	15.28	15.17	15.39	15.28	305	305	304	305	183.37	52500	286
M81	20	14	12.87	15.13	15.26	15.21	15.20	305	304	306	305	181.46	53500	295
M82	20	7	12.78	15.14	15.08	15.38	15.20	305	304	304	304	181.46	41000	226
M83	20	7	12.80	15.17	15.27	15.35	15.26	305	305	305	305	182.89	42000	230

ID	PR, %	Edad, d	Masa, kg	Diámetro, cm				Longitud, mm				Área, cm ²	P, kg	Xi, kg/cm ²
				D1	D2	D3	Dprom	L1	L2	L3	Lprom			
M84	0	28	12.90	15.102	15.195	15.174	15.16	303	304	305	304	180.50	65000	360
M85	0	28	13.01	15.297	15.169	15.182	15.22	305	305	305	305	181.94	64000	352
M86	0	14	13.04	15.18	15.173	15.258	15.20	304	304	303	304	181.46	56000	309
M87	40	28	12.69	15.32	15.22	15.13	15.22	305	304	305	305	181.94	55500	305
M88	40	14	12.69	15.31	15.24	15.15	15.23	304	303	304	304	182.18	48500	266
M89	40	14	12.73	15.26	15.15	15.28	15.23	305	304	305	305	182.18	47000	258
M90	40	7	12.69	15.19	15.32	15.14	15.21	303	304	304	304	181.70	38000	209
M91	100	28	12.19	15.23	15.31	15.15	15.23	304	303	304	304	182.18	53000	291
M92	100	28	12.16	15.23	15.02	15.35	15.20	304	304	304	304	181.46	51000	281
M93	100	28	12.08	15.23	15.14	15.17	15.18	303	304	303	303	180.98	50500	279
M94	100	28	12.17	15.23	15.21	15.24	15.22	304	303	304	304	181.94	50500	278
M95	100	28	12.20	15.20	15.38	15.18	15.25	304	303	303	303	182.65	53000	290
M96	100	28	12.13	15.30	15.18	15.17	15.22	303	303	303	303	181.94	51000	280

ANEXO F – MÓDULO DE RETURA DE ESPECIMENES PRISMÁTICOS

Ítem	ID	PR, %	Edad, d	L, cm	Ancho, cm				Alto, mm				Carga máxima, kg	Mr, kg/cm ²
					b1	b2	b3	bprom	h1	h2	h3	hprom		
M97	P0	0	28	45.0	15.00	15.02	15.01	15.01	15.20	15.24	15.22	15.22	2500	48.53
M98	P0	0	28	45.1	14.97	15.05	14.99	15.00	15.42	15.35	15.40	15.39	2310	43.99
M99	P0	0	28	45.1	14.79	14.80	14.82	14.80	15.29	15.33	15.35	15.32	2340	45.57
M100	P0	0	28	45.0	15.03	15.08	15.10	15.07	15.35	15.38	15.36	15.36	2180	41.39
M101	P0	0	28	45.0	15.01	15.05	15.03	15.03	15.47	15.46	15.44	15.46	2440	45.85
M102	P0	0	28	44.8	15.13	15.10	15.11	15.11	15.38	15.36	15.37	15.37	2480	46.69
M103	P1	20	28	45.3	15.13	15.15	15.10	15.13	15.40	15.40	15.40	15.40	2182	41.32
M104	P1	20	28	45.2	15.08	15.15	15.12	15.12	15.45	15.52	15.58	15.52	2300	42.82
M105	P1	20	28	45.1	15.00	15.30	15.15	15.15	15.70	15.68	15.72	15.70	2110	38.22
M106	P1	20	28	45.2	15.15	14.95	15.00	15.03	15.80	15.65	15.73	15.73	2200	40.11
M107	P1	20	28	45.3	15.00	15.21	15.12	15.11	15.80	15.80	15.79	15.80	2230	40.17
M108	P1	20	28	45.3	14.95	15.25	15.10	15.10	15.80	15.80	15.78	15.79	2210	39.89

ANEXO G – ESFUERZO VS DEFORMACIÓN UNITARIA

Espécimen M4 – Concreto de control

Carga (kg)	Deformación (mm)	Deformación unitaria (mm) (x1000)	Esfuerzo (kg/cm2)
0	0	0.00	0
1000	0.02	0.05	6
2000	0.04	0.13	11
3000	0.14	0.46	17
4000	0.23	0.76	22
5000	0.3	0.99	28
6000	0.34	1.12	33
7000	0.39	1.29	39
8000	0.44	1.45	44
9000	0.47	1.55	50
10000	0.52	1.72	55
11000	0.55	1.82	61
12000	0.59	1.95	67
13000	0.62	2.05	72
14000	0.65	2.15	78
15000	0.69	2.28	83
16000	0.72	2.38	89
17000	0.75	2.48	94
18000	0.78	2.58	100
19000	0.8	2.64	105
20000	0.83	2.74	111
21000	0.86	2.84	116
22000	0.88	2.91	122
23000	0.91	3.01	128

Espécimen M55 – PR 20%

Carga (kg)	Deformación (mm)	Deformación unitaria (mm) (x1000)	Esfuerzo (kg/cm2)
0	0	0.00	0
1000	0.02	0.05	5
2000	0.03	0.10	11
3000	0.11	0.36	16
4000	0.18	0.59	22
5000	0.24	0.79	27
6000	0.29	0.95	33
7000	0.34	1.12	38
8000	0.38	1.25	44
9000	0.43	1.41	49
10000	0.47	1.54	55
11000	0.51	1.67	60
12000	0.54	1.77	65
13000	0.58	1.90	71
14000	0.61	2.00	76
15000	0.64	2.10	82
16000	0.67	2.20	87
17000	0.7	2.30	93
18000	0.73	2.40	98
19000	0.76	2.49	104
20000	0.79	2.59	109
21000	0.82	2.69	115
22000	0.84	2.76	120
23000	0.87	2.86	125

Espécimen M4 – Concreto de control

Carga (kg)	Deformación (mm)	Deformación unitaria (mm) (x1000)	Esfuerzo (kg/cm2)
24000	0.93	3.07	133
25000	0.96	3.17	139
26000	0.98	3.24	144
27000	1.01	3.34	150
28000	1.03	3.40	155
29000	1.05	3.47	161
30000	1.08	3.57	166
31000	1.1	3.63	172
32000	1.13	3.73	178
33000	1.15	3.80	183
34000	1.17	3.87	189
35000	1.2	3.96	194
36000	1.22	4.03	200
37000	1.24	4.10	205
38000	1.26	4.16	211
39000	1.29	4.26	216
40000	1.31	4.33	222
41000	1.33	4.39	227
42000	1.35	4.46	233
43000	1.38	4.56	239
44000	1.4	4.63	244
45000	1.42	4.69	250
46000	1.45	4.79	255
47000	1.47	4.86	261
48000	1.49	4.92	266
49000	1.51	4.99	272
50000	1.54	5.09	277

Espécimen M55 – PR 20%

Carga (kg)	Deformación (mm)	Deformación unitaria (mm) (x1000)	Esfuerzo (kg/cm2)
24000	0.9	2.95	131
25000	0.92	3.02	136
26000	0.95	3.12	142
27000	0.97	3.18	147
28000	1	3.28	153
29000	1.02	3.35	158
30000	1.05	3.45	164
31000	1.08	3.54	169
32000	1.1	3.61	175
33000	1.12	3.68	180
34000	1.15	3.77	185
35000	1.17	3.84	191
36000	1.2	3.94	196
37000	1.23	4.04	202
38000	1.25	4.10	207
39000	1.27	4.17	213
40000	1.29	4.23	218
41000	1.32	4.33	224
42000	1.34	4.40	229
43000	1.36	4.46	234
44000	1.39	4.56	240
45000	1.41	4.63	245
46000	1.43	4.69	251
47000	1.45	4.76	256
48000	1.48	4.86	262
49000	1.51	4.96	267
50000	1.53	5.02	273

Espécimen M4 – Concreto de control

Carga (kg)	Deformación (mm)	Deformación unitaria (mm) (x1000)	Esfuerzo (kg/cm2)
51000	1.56	5.15	283
52000	1.58	5.22	288
53000	1.6	5.29	294
54000	1.63	5.39	300
55000	1.65	5.45	305
56000	1.68	5.55	311
57000	1.71	5.65	316
58000	1.74	5.75	322
59000	1.77	5.85	327
60000	1.79	5.91	333
61000	1.82	6.01	338
62000	1.85	6.11	344
63000	1.89	6.24	349
64000	1.94	6.41	355
64500	1.97	6.51	358
60000	2.1	6.94	333
35000	2.48	8.19	194

Espécimen M55 – PR 20%

Carga (kg)	Deformación (mm)	Deformación unitaria (mm) (x1000)	Esfuerzo (kg/cm2)
51000	1.56	5.12	278
52000	1.58	5.19	284
53000	1.61	5.28	289
54000	1.64	5.38	294
55000	1.67	5.48	300
56000	1.71	5.61	305
57000	1.75	5.74	311
58000	1.8	5.91	316
42000	1.85	6.07	229
35000	1.9	6.24	191

Espécimen M72 – PR 30%

Carga (kg)	Deformación (mm)	Deformación unitaria (mm) (x1000)	Esfuerzo (kg/cm2)
0	0	0.00	0
1000	0.02	0.05	6
2000	0.03	0.10	11
3000	0.1	0.33	17
4000	0.17	0.56	22
5000	0.24	0.79	28
6000	0.29	0.96	33
7000	0.34	1.12	39
8000	0.39	1.29	44
9000	0.43	1.42	50
10000	0.47	1.55	55
11000	0.51	1.68	61
12000	0.55	1.81	66
13000	0.58	1.91	72
14000	0.62	2.04	78
15000	0.65	2.14	83
16000	0.68	2.24	89
17000	0.71	2.34	94
18000	0.74	2.44	100
19000	0.77	2.54	105
20000	0.8	2.64	111
21000	0.83	2.74	116
22000	0.85	2.80	122
23000	0.88	2.90	127
24000	0.9	2.97	133
25000	0.93	3.07	139
26000	0.96	3.16	144

Espécimen M28 – PR 40%

Carga (kg)	Deformación (mm)	Deformación unitaria (mm) (x1000)	Esfuerzo (kg/cm2)
0	0	0.00	0
1000	0.02	0.05	5
2000	0.03	0.10	11
3000	0.07	0.23	16
4000	0.12	0.40	22
5000	0.17	0.56	27
6000	0.21	0.69	33
7000	0.24	0.79	38
8000	0.28	0.92	44
9000	0.32	1.06	49
10000	0.36	1.19	55
11000	0.39	1.29	60
12000	0.43	1.42	66
13000	0.46	1.52	71
14000	0.49	1.62	77
15000	0.52	1.72	82
16000	0.55	1.82	88
17000	0.59	1.95	93
18000	0.61	2.01	99
19000	0.64	2.11	104
20000	0.67	2.21	110
21000	0.7	2.31	115
22000	0.72	2.38	121
23000	0.75	2.48	126
24000	0.77	2.54	132
25000	0.79	2.61	137
26000	0.82	2.71	143

Espécimen M72 – PR 30%

Carga (kg)	Deformación (mm)	Deformación unitaria (mm) (x1000)	Esfuerzo (kg/cm2)
27000	0.98	3.23	150
28000	1.01	3.33	155
29000	1.03	3.40	161
30000	1.06	3.49	166
31000	1.09	3.59	172
32000	1.11	3.66	177
33000	1.13	3.73	183
34000	1.16	3.82	188
35000	1.18	3.89	194
36000	1.21	3.99	199
37000	1.23	4.05	205
38000	1.25	4.12	211
39000	1.28	4.22	216
40000	1.31	4.32	222
41000	1.33	4.38	227
42000	1.35	4.45	233
43000	1.38	4.55	238
44000	1.4	4.62	244
45000	1.43	4.71	249
46000	1.45	4.78	255
47000	1.48	4.88	260
48000	1.51	4.98	266
49000	1.53	5.04	271
50000	1.56	5.14	277
51000	1.59	5.24	283
52000	1.62	5.34	288
53000	1.65	5.44	294

Espécimen M28 – PR 40%

Carga (kg)	Deformación (mm)	Deformación unitaria (mm) (x1000)	Esfuerzo (kg/cm2)
27000	0.84	2.77	148
28000	0.87	2.87	154
29000	0.89	2.94	159
30000	0.92	3.04	165
31000	0.94	3.10	170
32000	0.96	3.17	176
33000	0.99	3.27	181
34000	1.01	3.33	187
35000	1.03	3.40	192
36000	1.06	3.50	198
37000	1.08	3.56	203
38000	1.1	3.63	209
39000	1.13	3.73	214
40000	1.15	3.80	220
41000	1.17	3.86	225
42000	1.19	3.93	231
43000	1.22	4.03	236
44000	1.24	4.09	242
45000	1.27	4.19	247
46000	1.3	4.29	253
47000	1.33	4.39	258
48000	1.36	4.49	263
49000	1.38	4.55	269
50000	1.41	4.65	274
51000	1.44	4.75	280
52000	1.48	4.88	285
53000	1.51	4.98	291

Espécimen M72 – PR 30%

Carga (kg)	Deformación (mm)	Deformación unitaria (mm) (x1000)	Esfuerzo (kg/cm2)
54000	1.68	5.54	299
55000	1.72	5.67	305
56000	1.76	5.80	310
57000	1.81	5.97	316
57500	1.87	6.16	319
55000	1.91	6.30	305
50000	1.97	6.49	277

Espécimen M28 – PR 40%

Carga (kg)	Deformación (mm)	Deformación unitaria (mm) (x1000)	Esfuerzo (kg/cm2)
54000	1.55	5.12	296
55000	1.61	5.31	302
55500	1.69	5.58	305
30000	1.79	5.91	165

Espécimen M66 – PR 50%

Carga (kg)	Deformación (mm)	Deformación unitaria (mm) (x1000)	Esfuerzo (kg/cm2)
0	0	0.00	0
1000	0.02	0.05	5
2000	0.04	0.13	11
3000	0.1	0.33	16
4000	0.18	0.60	22
5000	0.25	0.83	27
6000	0.3	0.99	33
7000	0.34	1.12	38

Espécimen M94 PR 100%

Carga (kg)	Deformación (mm)	Deformación unitaria (mm) (x1000)	Esfuerzo (kg/cm2)
0	0	0.00	0
1000	0.02	0.05	5
2000	0.03	0.10	11
3000	0.08	0.26	16
4000	0.13	0.43	22
5000	0.19	0.63	27
6000	0.24	0.79	33
7000	0.29	0.95	38

Espécimen M66 – PR 50%

Carga (kg)	Deformación (mm)	Deformación unitaria (mm) (x1000)	Esfuerzo (kg/cm2)
8000	0.38	1.26	44
9000	0.42	1.39	49
10000	0.46	1.52	54
11000	0.5	1.65	60
12000	0.54	1.79	65
13000	0.57	1.89	71
14000	0.6	1.98	76
15000	0.63	2.08	82
16000	0.66	2.18	87
17000	0.68	2.25	92
18000	0.71	2.35	98
19000	0.74	2.45	103
20000	0.76	2.51	109
21000	0.79	2.61	114
22000	0.82	2.71	120
23000	0.85	2.81	125
24000	0.87	2.88	131
25000	0.9	2.98	136
26000	0.93	3.08	141

Espécimen M94 PR 100%

Carga (kg)	Deformación (mm)	Deformación unitaria (mm) (x1000)	Esfuerzo (kg/cm2)
8000	0.33	1.09	44
9000	0.37	1.22	49
10000	0.41	1.35	55
11000	0.44	1.45	60
12000	0.48	1.58	66
13000	0.51	1.68	71
14000	0.54	1.78	77
15000	0.57	1.88	82
16000	0.6	1.98	88
17000	0.63	2.07	93
18000	0.66	2.17	99
19000	0.68	2.24	104
20000	0.7	2.31	110
21000	0.72	2.37	115
22000	0.74	2.44	121
23000	0.77	2.54	126
24000	0.79	2.60	132
25000	0.82	2.70	137
26000	0.84	2.77	143

Espécimen M66 – PR 50%

Carga (kg)	Deformación (mm)	Deformación unitaria (mm) (x1000)	Esfuerzo (kg/cm2)
27000	0.96	3.18	147
28000	0.99	3.27	152
29000	1.01	3.34	158
30000	1.03	3.41	163
31000	1.05	3.47	169
32000	1.07	3.54	174
33000	1.1	3.64	179
34000	1.12	3.70	185
35000	1.14	3.77	190
36000	1.17	3.87	196
37000	1.2	3.97	201
38000	1.22	4.04	207
39000	1.24	4.10	212
40000	1.27	4.20	218
41000	1.3	4.30	223
42000	1.33	4.40	228
43000	1.35	4.47	234
44000	1.38	4.56	239
45000	1.4	4.63	245

Espécimen M94 PR 100%

Carga (kg)	Deformación (mm)	Deformación unitaria (mm) (x1000)	Esfuerzo (kg/cm2)
27000	0.86	2.83	148
28000	0.89	2.93	154
29000	0.91	3.00	159
30000	0.94	3.10	165
31000	0.96	3.16	170
32000	0.99	3.26	176
33000	1.01	3.33	181
34000	1.04	3.42	187
35000	1.07	3.52	192
36000	1.1	3.62	198
37000	1.12	3.69	203
38000	1.15	3.79	209
39000	1.18	3.89	214
40000	1.21	3.98	220
41000	1.24	4.08	225
42000	1.27	4.18	231
43000	1.31	4.31	236
44000	1.35	4.45	242
45000	1.38	4.54	247

Espécimen M66 – PR 50%

Carga (kg)	Deformación (mm)	Deformación unitaria (mm) (x1000)	Esfuerzo (kg/cm2)
46000	1.43	4.73	250
47000	1.47	4.86	256
48000	1.5	4.96	261
49000	1.54	5.09	267
50000	1.57	5.19	272
51000	1.61	5.33	277
52000	1.67	5.52	283
53000	1.71	5.66	288
54000	1.76	5.82	294
54500	1.88	6.22	296
50000	1.98	6.55	272
45000	2.06	6.81	245

Espécimen M94 PR 100%

Carga (kg)	Deformación (mm)	Deformación unitaria (mm) (x1000)	Esfuerzo (kg/cm2)
46000	1.41	4.64	253
47000	1.45	4.77	258
48000	1.5	4.94	264
49000	1.55	5.10	269
50000	1.6	5.27	275
50500	1.69	5.57	278
40000	1.8	5.93	220